

2019（令和元）年度 修士学位論文

気化式広域加湿器の能力向上についての検討

Humidifying performance enhancement of
wide-range type humidifier

2020 年 3 月 9 日

高知工科大学大学院 工学研究科基盤工学専攻
知能機械システム工学コース

1225057 山口 翼

指導教員 松本 泰典

目次

| | |
|--------------------------------|----|
| 第1章 緒論 | 1 |
| 1.1. 研究背景 | 1 |
| 1.2. 加湿器の種類 | 1 |
| 1.3. 研究目的 | 2 |
| 第2章 気化式加湿器の気化特性を表す係数について | 3 |
| 2.1. 実験目的 | 3 |
| 2.2. 実験装置 | 3 |
| 2.3 低温恒温恒湿機内の拡散層厚さについて | 4 |
| 2.3.1 実験方法 | 4 |
| 2.3.2 実験結果 | 4 |
| 2.3.3 考察 | 5 |
| 2.4 膜の加湿評価法について | 8 |
| 2.4.1 実験方法 | 8 |
| 2.4.2 実験結果 | 9 |
| 2.4.3 考察 | 10 |
| 第3章 密閉状態での膜を透過した気化量の測定 | 14 |
| 3.1. 実験目的 | 14 |
| 3.2. 低温恒温恒湿機内の温湿度測定 | 14 |
| 3.3. 実験方法 | 16 |
| 3.4. 実験結果 | 17 |
| 3.5. 考察 | 18 |
| 第4章 乱流状態が及ぼす気化量への影響 | 21 |
| 4.1. 実験目的 | 21 |
| 4.3. 実験装置内の空気の流れの可視化 | 23 |
| 4.3.1. 実験方法 | 23 |
| 4.3.2. 実験結果 | 24 |
| 4.4. 乱流状態による変化 | 26 |
| 4.4.1. 実験方法 | 26 |
| 4.4.2. 実験結果 | 26 |
| 4.5. 考察 | 38 |
| 第5章 結言 | 40 |
| 参考文献・謝辞 | |

第1章 緒論

1.1. 研究背景

国内では冬季になると気温、湿度ともに低くなり、インフルエンザなどの病気を発症するリスクが高くなる¹⁾。また、新型コロナウイルス感染症といった新たなウィルスの対策においても環境制御がさらに注目されている。人は環境において湿度が15%減少すると体感温度が0.5℃低下するため、乾燥状態なりやすい冬季はより寒さを感じやすくなる²⁾。これらの対応策として室内空間では加湿器を用いた湿度コントロールを行うことが、空気の乾燥状態を防ぐために必要であると認知されている。一般的に人間が生活をするうえでの適正湿度は40~60%と言われており、建築物における衛生的環境の確保に関する法律では、建築物内の湿度を40%以上に保つことが定められている。しかし、平成15年度の調査の結果では湿度不適合率が36.5%で、そのほとんどが湿度40%以下が原因とされ、多くの建物では加湿を行う必要があると言える^{3) 4)}。

ここでの湿度というのは相対湿度のことを意味し、ある温度での飽和水蒸気量 $m_{Max}[\text{g}/\text{m}^3]$ に対する空気中の水蒸気量の比 $m[\text{g}/\text{m}^3]$ であり、相対湿度 U は、

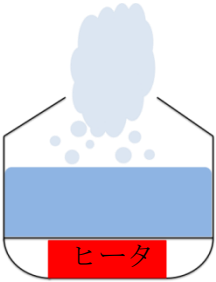
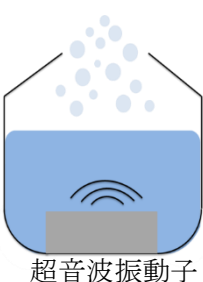
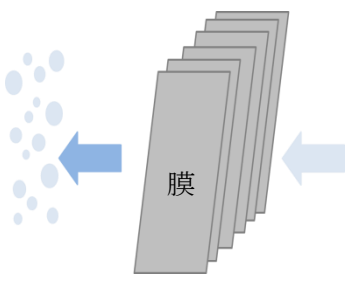
$$U = \frac{m}{m_{max}} \times 100 \quad (1-1)$$

のように求められる。

1.2. 加湿器の種類

現在主に使用されている加湿器の種類は Table 1-1 に示すように、蒸発式、超音波式、および気化式の3種類である。蒸発式の加湿器は水をヒータで加熱することで水蒸気を発生させる方式である。超音波式は水に超音波の振動を与えることで、霧状の水滴を空気中に放出する方式である。また、気化式は水を保持した膜からなる加湿エレメントに対して空気を接触させることで、膜内から気化した水蒸気を空気中に放出する方式である。それぞれの課題点として、蒸発式では消費電力が大きいこと、また温度の高い水蒸気を放出するため火傷の危険性が高い。超音波式は水中の不純物や雑菌なども空気中に散布してしまう。また周囲の温度や湿度によって散布した水が気化されず、周囲に水滴が落下してしまいカビなどの原因になる恐れがある。気化式は周囲の温度や湿度によって加湿量が変化するため、急速な加湿が困難である。しかし、気化式では他の方式とは異なり排出する空気の温度が低く、膜によって不純物も遮断されるため安全性が高い方式と言える。また、過剰加湿が発生せず、静音性も高いことから多くの人が集まる公共施設などでの使用に適している方式でもある。

Table 1-1 各加湿方法式の比較

| | 蒸発式 | 超音波式 | 気化式 |
|-------|---|---|---|
| |  |  |  |
| メリット | 加湿効率が良い 室温が上がる | 小型化がしやすい | 安全性が高い 過剰加湿が発生しない |
| デメリット | 過剰加湿が起きる 火傷する恐れがある | 不純物や雑菌等も 散布してしまう | 加湿効率が悪い |

1.3. 研究目的

気化式の加湿器は安全性が高く、多くの人が集まる公共施設での使用に適しているが、他の方式と比較した際に加湿能力が低いことから、広域を加湿する際には複数台使用する必要がある。

本研究では 1 台の気化式加湿器の使用で、広域でも十分な加湿が可能となるよう、気化式加湿器に使用されている膜の加湿評価が行える方法について検討を行い、加湿効果に適する膜を決定した。また、本膜を装着した加湿ユニットに対して空気の乱流状態が加湿量に対しての影響を調べた。

第2章 気化式加湿器の気化特性を表す係数について

2.1. 実験目的

気化式加湿器の加湿ユニットに使用されている膜は構造が複雑なため、加湿の効率性に関係する膜内の拡散係数の評価が明確になっていない。そこで、ポリプロピレン(以下、PP)とポリテトラフルオロエチレン(以下、PTFE)の疎水性濾材を用いた際の気化量を測定し、測定結果から膜の加湿評価が行える拡散係数を得る方法について検討を行った。

2.2. 実験装置

実験中に雰囲気のパラメータとなる空気の温度と湿度を一定に保つために、使用した低温恒温恒湿機(いすゞ製, HPAF-288-40)を Fig. 2-1 に示す。本機の内部はシロッコファンを用いて Fig. 2-2 のように強制対流をさせることにより温度と湿度を一定に保つことが可能である、内部の寸法は幅 800mm, 高さ 600 mm, 奥行き 600 mmである。



Fig. 2-1 低温恒温恒湿機内

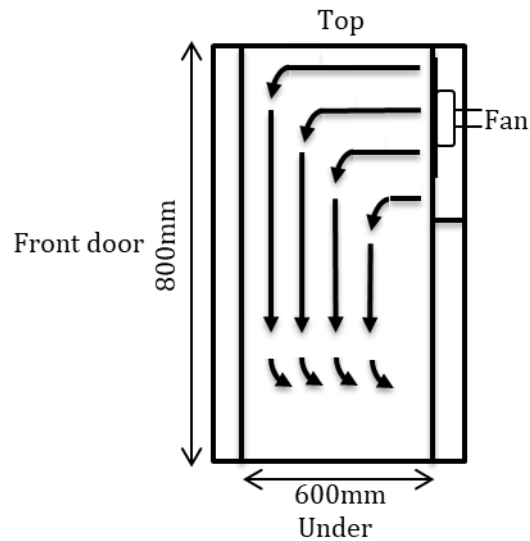


Fig. 2-2 低温恒温恒湿機内の空気の流れ

2.3 低温恒温恒湿機内の拡散層厚さについて

2.3.1 実験方法

低温恒温恒湿機内を温度24℃、湿度 20%、30%、40%のそれぞれで一定に保ち、Fig. 2-3 に示すように樹脂製容器(アズワン製、4-5633-02)の上部を切断し、カップ状に加工した容器に水 200ml を入れ、1 時間間隔で重量を重量計(アズワン製、AXA10002)で 6 回測定し、3 回行った平均値を結果にまとめた。計測した質量差から気化量を求め、水面近傍での水蒸気の拡散層厚さを求めた。

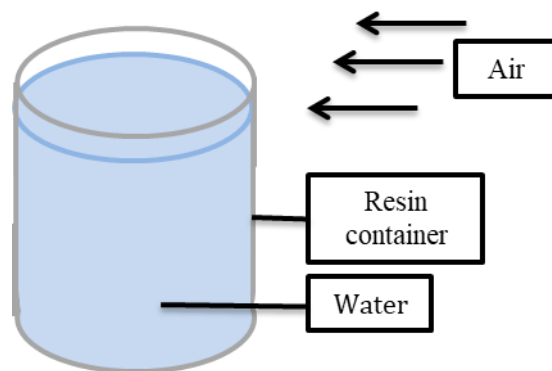


Fig. 2-3 実験の概略

2.3.2 実験結果

実験結果を Fig. 2-4 に示す。実験開始から 2 時間以降の気化量が安定したため、2 時間以降のデータが有効であると見做し、気化量の平均値を求めた(Table2-1)。その結果より湿度が高いほど気化量が少なくなる傾向になった。また、湿度が30%と 40%ではわずかに気化量が減少する傾向もみられた。

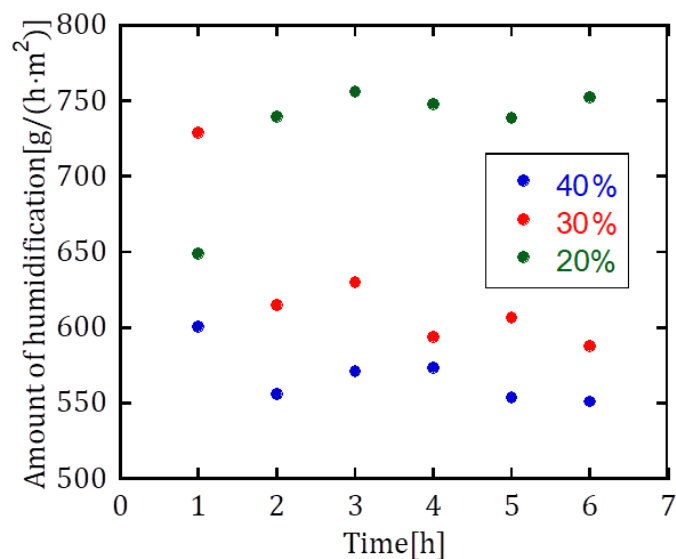


Fig.2-4 湿度による気化量の違い

Table2-1 湿度による気化量の平均値

| Humidity[%] | Amount of humidification [g/(m²·h)] |
|-------------|--|
| 40 | 561.1 |
| 30 | 606.6 |
| 20 | 740.0 |

2.3.3 考察

実験結果を用いて、水面近傍の水蒸気の拡散層厚さを求める。物質の拡散に関する基本となるフィックの法則は、

$$J = -D \frac{d\rho}{dx} \quad (2-1)$$

J : 気化量[g/(m²·s)] D : 拡散係数[m²/s]

ρ : 密度[g/m³] x : 距離[m]

のように表される。次に理想気体の状態方程式は、

$$PV = nRT \quad (2-2)$$

P : 圧力[Pa] V : 体積[m³]

n : 物質量[mol] T : 温度[K]

R : 気体定数(= 8.31[Pa·m³/(K·mol)])

である。水蒸気 (H₂O) の分子量を $M(=18)$ とすると質量は、

$$Mn = \rho V \quad (2-3)$$

となり、式(2-2)、(2-3)より、

$$\rho = \frac{MP}{RT} \quad (2-4)$$

の密度に関する式が得られる．ここで，Fig. 2-5 に示すような水面近傍について考えると，水面を基準とした垂直な x 軸方向に対して，式(2-4)の両辺を x で微分すると

$$\frac{d\rho}{dx} = \frac{M}{RT} \frac{dP}{dx} \quad (2-5)$$

のように表される．

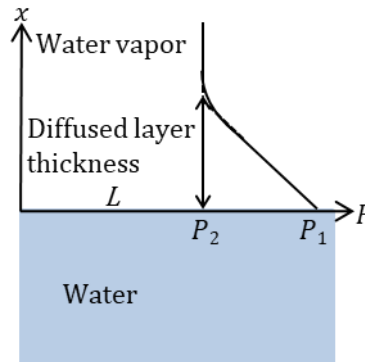


Fig. 2-5 水面の概略

式(2-5)より式(2-1)の気化量 J は，

$$J = -D \frac{M}{RT} \frac{dP}{dx} \quad (2-6)$$

$$J = -D \frac{M}{RT} \frac{P_2 - P_1}{L} \quad (2-7)$$

P_1 : 水面の水蒸気圧[Pa]

P_2 : 大気中の水蒸気圧[Pa],

L : 拡散層の厚さ[m]

から求めることができ，式(2-7)より拡散層厚さ L は，

$$L = -D \frac{M}{RT} \frac{P_2 - P_1}{J} \quad (2-8)$$

のように表すことができる．水面の特徴として水面に密接する空気は，水蒸気と水が共存し平衡な状態であるため，湿度が 100%となる．このことから，水面での水蒸気圧 P_1 は飽和水蒸気圧となる．水の飽和水蒸気圧は Table2-2 に示す⁵⁾．

Table2-2 水の飽和水蒸気圧

| Temp. [°C] | 0.0 | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.9 |
|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 21 | 2488 | 2504 | 2519 | 2534 | 2550 | 2566 | 2581 | 2597 | 2613 | 2629 |
| 22 | 2645 | 2662 | 2678 | 2694 | 2711 | 2727 | 2744 | 2760 | 2777 | 2794 |
| 23 | 2810 | 2828 | 2845 | 2845 | 2863 | 2880 | 2915 | 2932 | 2950 | 2968 |
| 24 | 2986 | 3004 | 3022 | 3022 | 3054 | 3077 | 3095 | 3114 | 3132 | 3151 |
| 25 | 3170 | 3189 | 3208 | 3227 | 3246 | 3266 | 3285 | 3305 | 3324 | 3344 |

[Pa]

24°Cのときの飽和水蒸気圧は2986Paとなる．また温度24°Cのときの水蒸気の拡散係数 D は、

$$D = 0.241 \left(\frac{273 + T}{288} \right)^{1.75} \left(\frac{P_0}{P} \right) \times 10^{-4} \quad (2-9)$$

より、 $D = 0.2543 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$ である．これらの値と式(2-8)より湿度 20%~40%のときの拡散層厚さ L_{20} 、 L_{30} 、 L_{40} は、

$$L_{40} = -0.2543 \times 10^{-4} \frac{18}{8.31 \times 297} \frac{1194 - 2986}{561.1/3600}$$

$$= 2.13 \times 10^{-3} \text{m}$$

$$L_{30} = -0.2543 \times 10^{-4} \frac{18}{8.31 \times 297} \frac{896 - 2986}{606.6/3600}$$

$$= 2.30 \times 10^{-3} \text{m}$$

$$L_{20} = -0.2543 \times 10^{-4} \frac{18}{8.31 \times 297} \frac{597 - 2986}{740.0/3600}$$

$$= 2.13 \times 10^{-3} \text{m}$$

となる．拡散層厚さ L は表面の形状，風速，湿度など様々な状態により1cm あるいはそれ以上になることもあり，また2~3mm 以下になることもあるため，値が大きく変化する。しかし，今回の実験では湿度を変化させても拡散層厚さはほぼ等しい値となった．これは，低温恒温恒湿機内では強制対流により温度と湿度を一定に保っているため，強制対流が拡散層厚さに大きな影響を及ぼし，湿度の影響が少なかったと考えられる．このことから，低温恒温恒湿機内で実験を行う場合は水蒸気の拡散厚さは湿度による変化がないものと考え、実験結果の平均値より $L = 2.18 \text{mm}$ とする．

2.4 膜の加湿評価法について

2.4.1 実験方法

低温恒温恒湿機内を温度24℃、湿度40%で一定に保ち、Fig. 2-6 に示すように純水 200mL を入れた樹脂製容器と、膜を挟んだプラスチックホルダー(アドバンテックス製, PPO-47) をホースで接続した装置を 3 つ設置し、1 時間間隔で重量を 6 回測定した。計測した 3 つの重量差の平均値から膜を透過した 1 時間当たりの気化量を求め、実験に用いた膜の内部の拡散係数を調べた。

使用した膜は Table2-1 で示すように、Water break through(以下, WBT)という疎水性濾材(不織布とメンブレンフィルター)に対して、水が透過し始める際の膜にかかる圧力が異なるものを使用した。

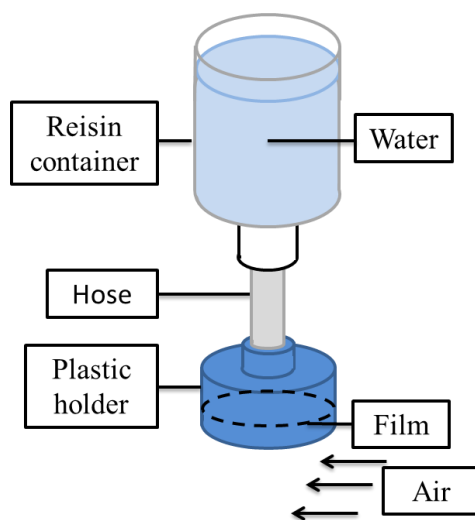


Fig. 2-6 実験装置の概略

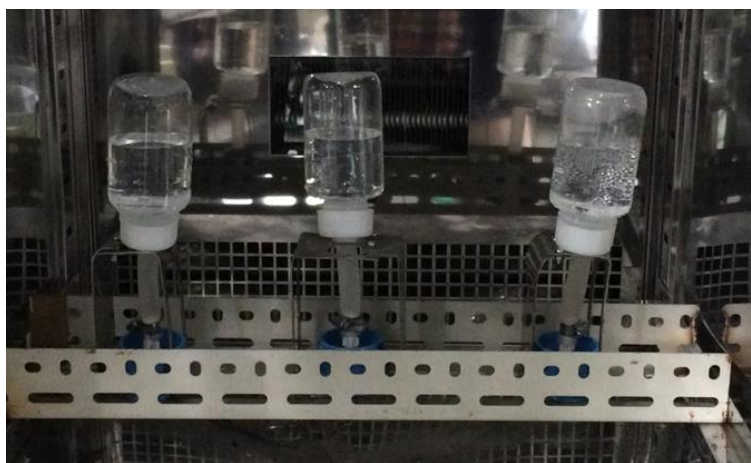


Fig. 2-7 低温恒温恒湿機内の様子

Table2-1 膜の種類

| | PP non-woven fabric | | |
|-----------------------|-------------------------|---------|---------|
| Material | Polypropylene | | |
| WBT[kPa] | 12 | 20 | 44 |
| Film thickness[mm] | 0.0187 | 0.0142 | 0.0291 |
| Area[m ²] | 1.39×10^{-3} | | |
| | PTFE membrane | | |
| Material | Polytetrafluoroethylene | | |
| WBT[kPa] | 50 | 227 | >400 |
| Film thickness[mm] | 0.00513 | 0.00433 | 0.00370 |
| Area[m ²] | 1.39×10^{-3} | | |

2.4.2 実験結果

PP 不織布の実験結果を Fig. 2-8 に、PTFE 膜の実験結果を Fig. 2-6 に示す．すべての膜で開始 1 時間の測定値が 2 時間以降の値より大きくなる傾向がみられた．そのため 2 時間以降の値が有効であるとし、それぞれの膜に対して気化量の平均値を Table2-2 に示す．膜の材質別に比較すると PTFE 膜からの気化量が全体的に PP 不織布からの気化量より値が大きくなった．また、PP 不織布は WBT 値が低いほど、気化量が多い．一方、PTFE 膜は気化量が WBT 値の影響をほぼ受けないという特徴がみられた．

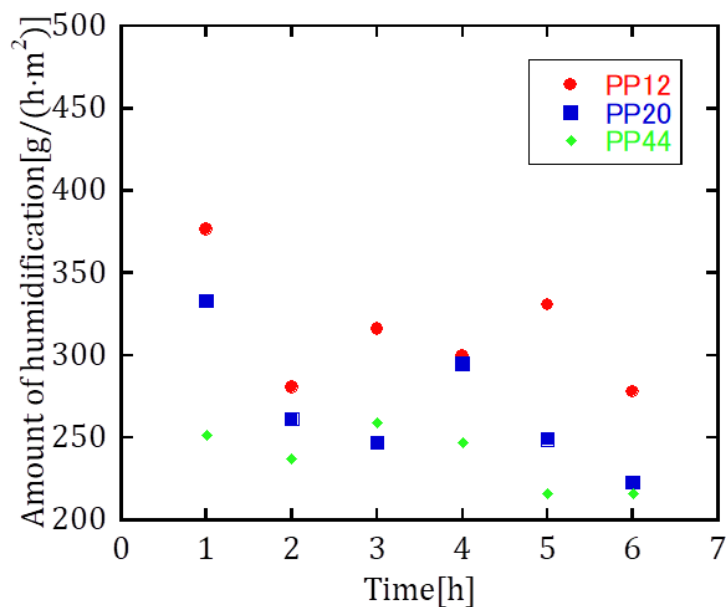


Fig. 2-8 PP 不織布の実験結果

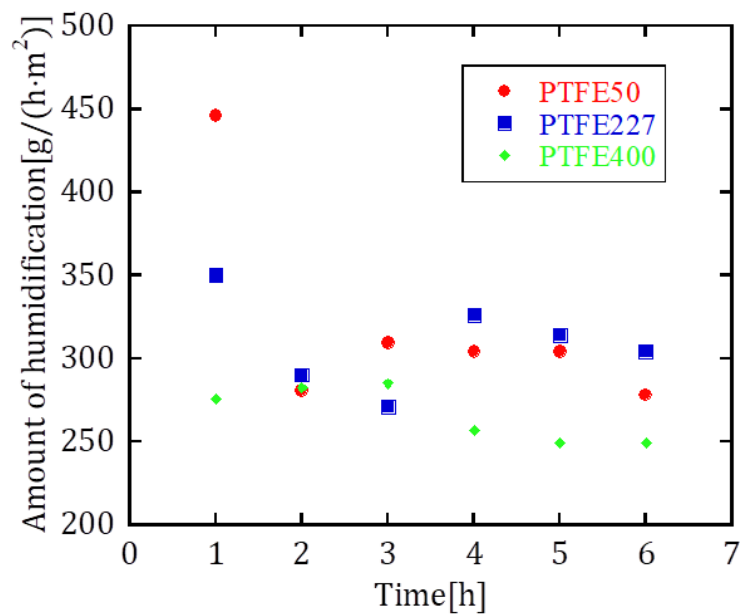


Fig. 2-9 PTFE 膜の実験結果

Table 2-2 膜からの平均気化量

| | PP12 | PP20 | PP44 |
|---------------------|--------|---------|---------|
| Vaporization amount | 301.2 | 235.0 | 255.2 |
| | PTFE50 | PTFE227 | PTFE400 |
| Vaporization amount | 295.4 | 301.2 | 264.7 |

[g/(h · m²)]

2.4.3 考察

実験結果を用い、フィックの法則から膜の評価を行う。まず、膜を用いた際の水の気化を、Fig. 2-10 のように膜内の拡散と膜外の拡散の 2 つに分けて考える。

① 膜内の拡散

膜内の拡散は式(2-7)より、

$$J_m = -D_m \frac{M}{RT} \frac{P_3 - P_1}{L_m}$$

$$-\frac{RT}{M} \frac{J_m L_m}{D_m} = P_3 - P_1 \quad (2-10)$$

J_m : 膜内の気化量[g/(m²·s)] L_m : 膜の厚さ[m]

D_m : 膜内の拡散係数[m²/s]

となる。

② 膜外の拡散

膜外の拡散は式(2-7)より,

$$J_w = -D \frac{M}{RT} \frac{P_2 - P_3}{L_w}$$

$$-\frac{RT}{M} \frac{J_w L_w}{D} = P_2 - P_3 \quad (2-11)$$

J_w : 膜外の気化量[g/(m²・s)] L_w : 水蒸気の拡散層の厚さ[m]

のように表される.

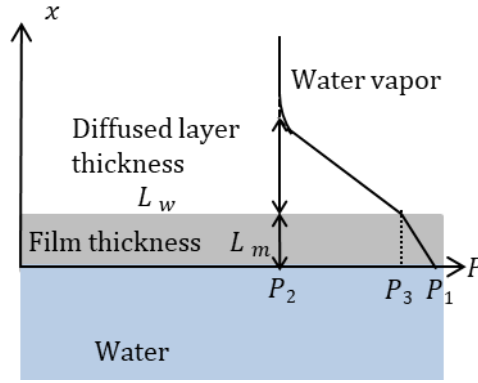


Fig. 2-10 膜近傍の概略

式(2-8), (2-9)それぞれを, P_3 について解き, P_1 と P_2 の関係式を求めると,

$$-\frac{RT}{M} \left(\frac{J_m L_m}{D_m} + \frac{J_w L_w}{D} \right) = P_2 - P_1 \quad (2-12)$$

である. 式(2-7), (2-10)より,

$$-\frac{RT}{M} \left(\frac{J_m L_m}{D_m} + \frac{J_w L_w}{D} \right) = -\frac{RT}{M} \frac{J L}{D} \quad (2-13)$$

が求められる. ここで定常状態のとき, 膜内の気化量 J_m と膜外の気化量 J_w は $J_m = J_w$ となる.

低温恒温恒湿機内では強制対流の影響を大きく受けるため水蒸気の拡散層厚さはほとんど変化しないため, $L_w = L = 2.18\text{mm}$ となる. したがって, 式(2-11)から膜内の拡散係数は,

$$D_m = \frac{L_m}{L} \frac{J_m D}{J - J_m} \quad (2-14)$$

にて求めることができる. 実験結果と式(2-14)より求めた膜内の拡散係数を Fig. 2-11 に示す.

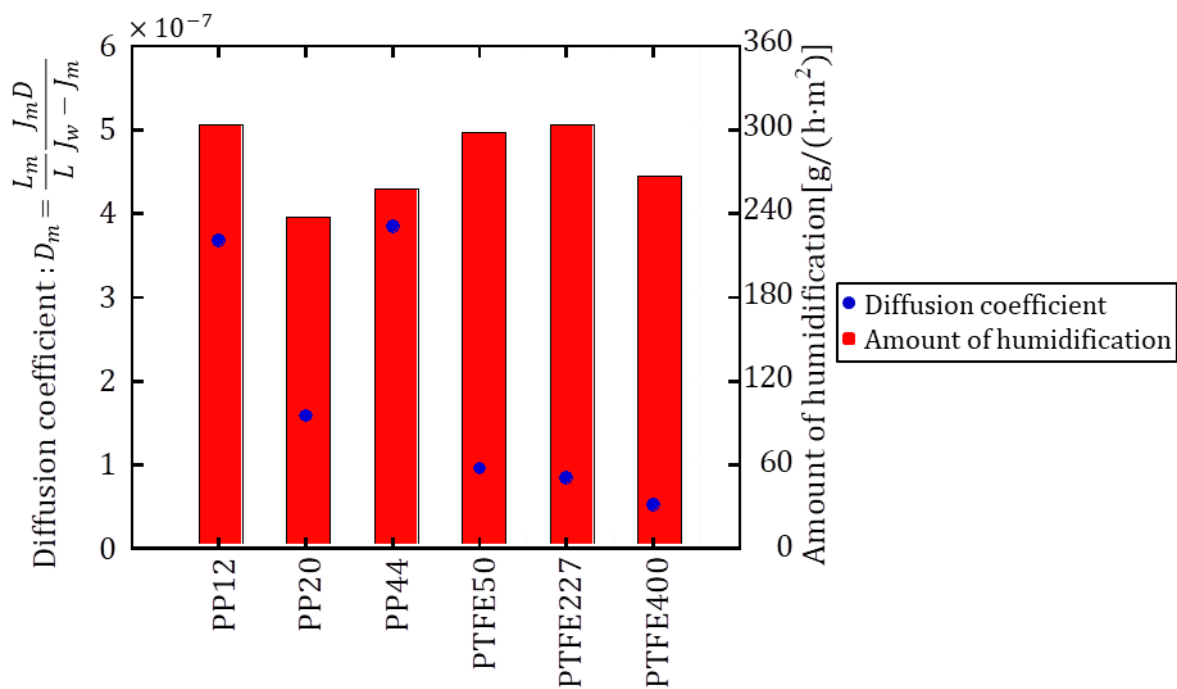


Fig.2-11 膜内の拡散係数と気化量の比較

実験結果と膜内の拡散係数を比較すると、気化量の少ない膜でも膜内の拡散係数の値が高い場合がある。本来、拡散係数はフィックの法則から気化量との相関がみられるはずである。しかし、本実験では関係性がみられなかった。そこで、膜の拡散係数を求める式(2-14)に着目すると、式中に膜の厚さ L_m が存在している。しかし、実験に使用した膜の厚さはそれぞれ異なっていたため、膜内の拡散係数と気化量に関係性がみられなかったと考えられる。そこで、膜内の拡散係数を膜の厚さで割った膜内の単位厚さ当たりの拡散係数を Fig. 2-12 に、膜内の単位厚さ当たりの拡散係数と気化量の相関性を Fig.2-13 に示す。Fig.2-13 より膜内の単位厚さ当たりの拡散係数は実験結果の気化量と相関性がみられた。そのため膜の気化特性を判断する際には、膜内の拡散係数ではなく膜内の単位厚さ当たりの拡散係数で判断する必要がある。

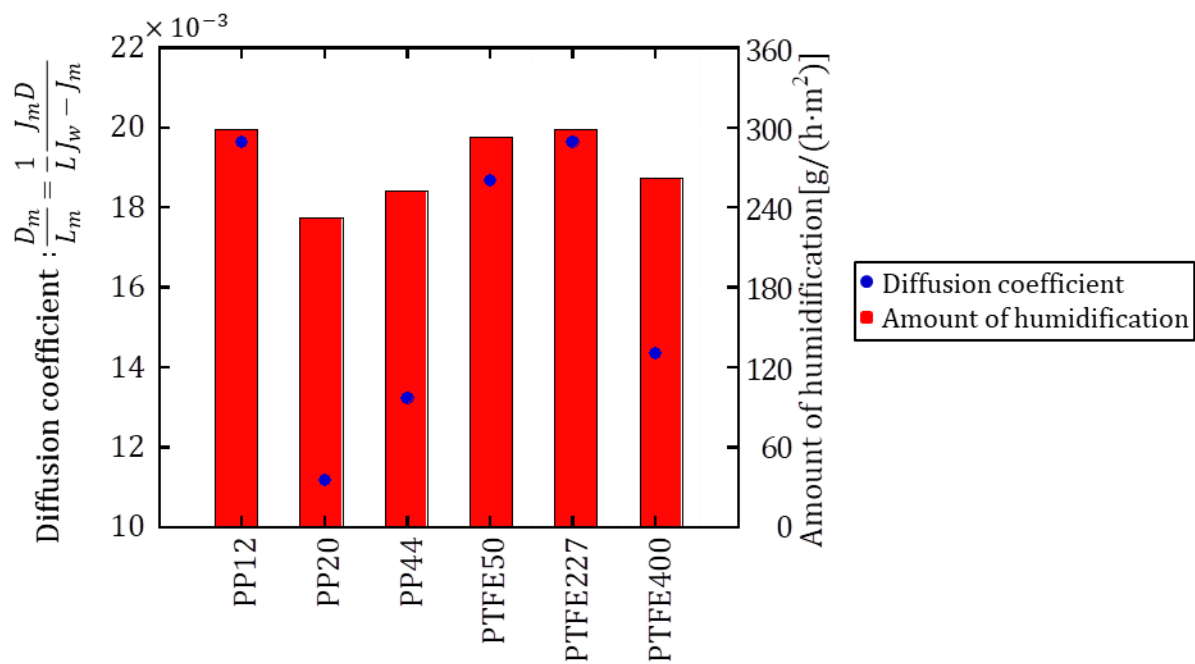


Fig. 2-12 膜内の単位厚さ当たりの拡散係数と気化量の比較

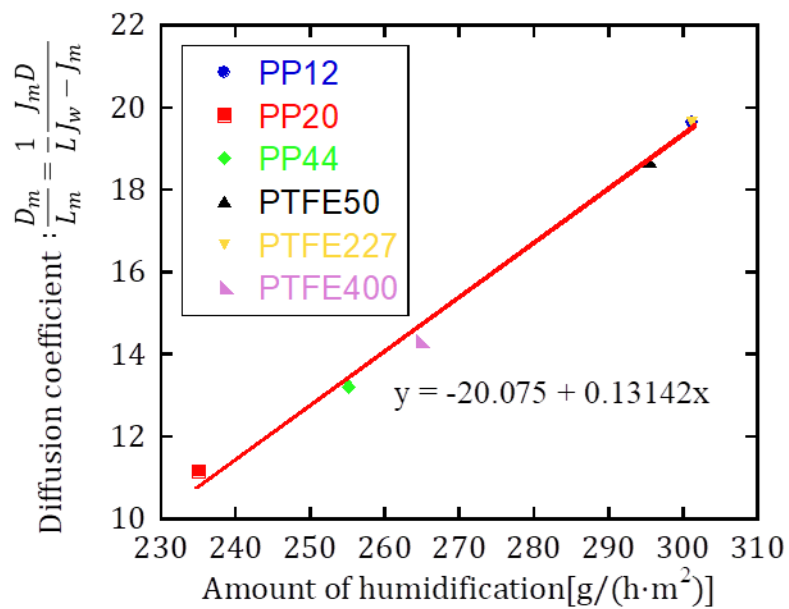


Fig. 2-13 膜内の単位厚さ当たりの拡散係数と気化量の相関性

第3章 密閉状態での膜を透過した気化量の測定

3.1. 実験目的

前章で膜の気化特性である膜内の単位厚さ拡散係数を求めることができた。しかし、膜内の単位厚さ拡散係数を求める際に、膜を用いた際の気化量を測定したが、その結果が1時間ごとに変化がみられた。そのため、より正確に膜内の単位厚さ当たりの拡散係数を求めるために安定した測定を行うことのできる方法について検討を行った。

3.2. 低温恒温恒湿機内の温湿度測定

前章の実験中の低温恒温恒湿機内の温度と湿度を温湿度計(エー・アンド・デイ社製, AD-5696)を用いて測定した温度の結果を Fig. 3-1 に、湿度の結果を Fig. 3-2 に示す。1時間ごとに温度、湿度ともに上昇する傾向が得られた。この傾向は1時間毎に実験装置の質量を計測する際に装置を取り出す必要があり、そのたびに低温恒温恒湿機の扉を開閉したことが原因である。これにより、低温恒温恒湿機内が常に安定した状態を保つことができず、1時間ごとの気化量が不安定になってしまったと考えられる。

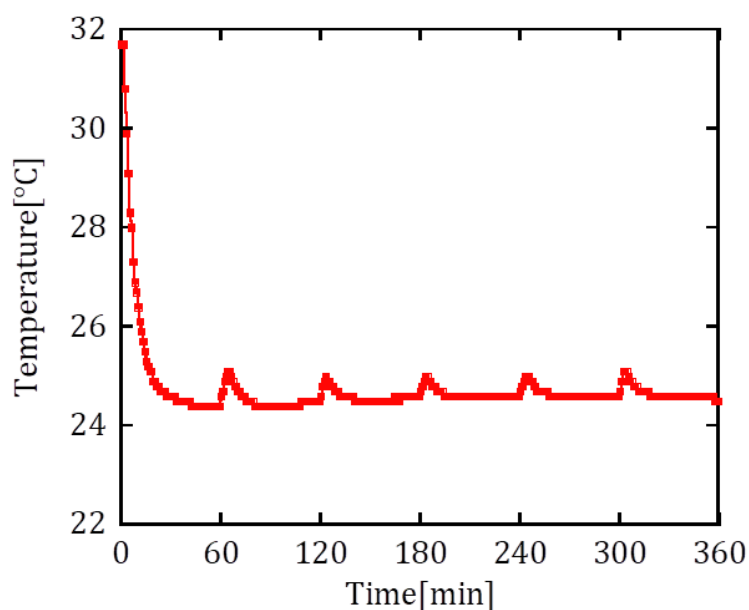


Fig. 3-1 温度の時間変化

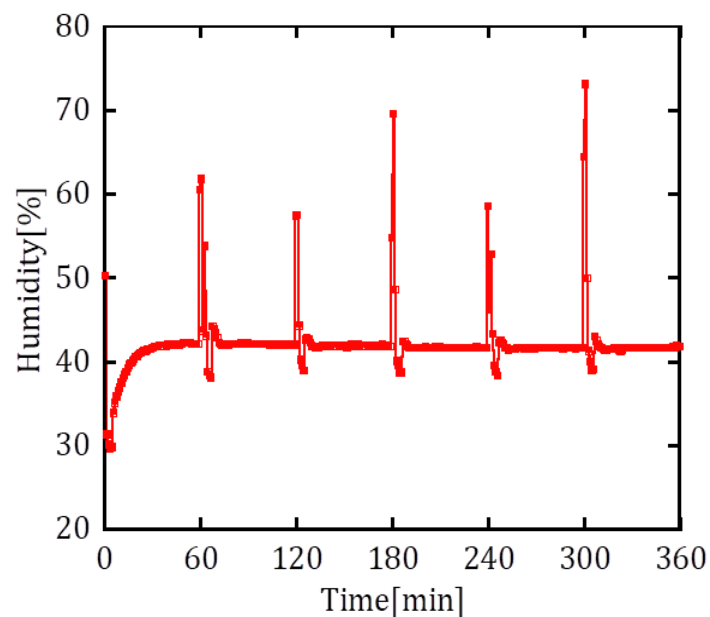


Fig. 3-2 湿度の時間変化

次に、低温恒温恒湿機の扉を開閉せずに 6 時間、温湿度計で温度と湿度を測定した。設定温度と湿度は24℃，40%で行った。測定した結果の温度を Fig. 3-3 に、湿度を Fig. 3-4 に示す。Fig. 3-3， Fig3-4 より常に温度，湿度が安定していた。本結果より低温恒温恒湿機の扉の開閉操作をなくすことで低温恒温恒湿機内の状態が安定することを確認した。そのため、低温恒温恒湿の扉を開閉することなく気化量を測定する方法について検討する必要がある。そこで、密閉状態でも計測結果を記録することが可能である、データロガーを用いた測定方法の検討を行った。

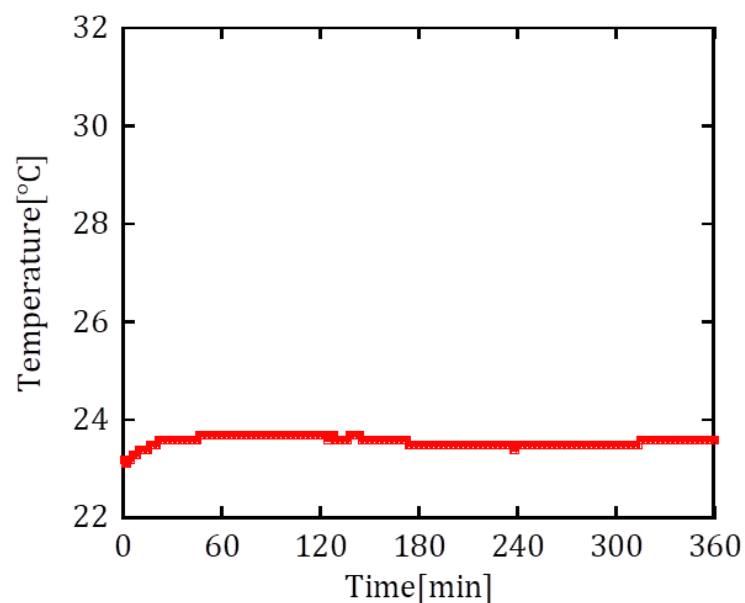


Fig. 3-3 温度の時間変化

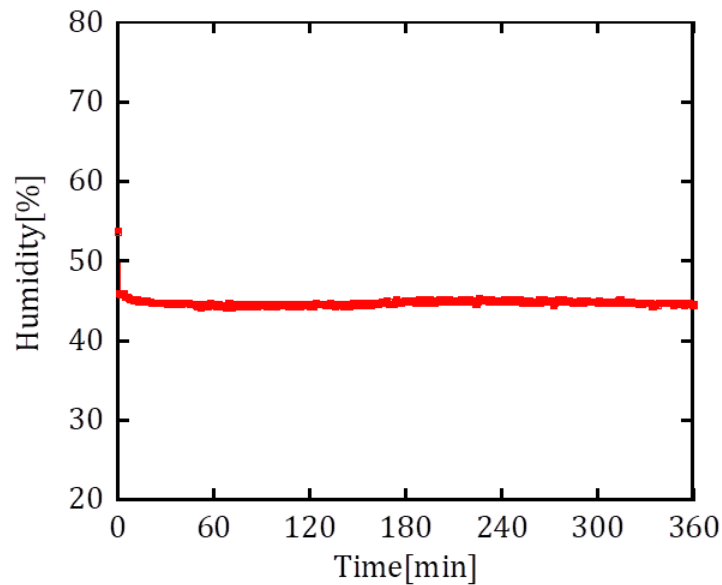


Fig. 3-4 湿度の時間変化

3.3. 実験方法

低温恒温恒湿機内を温度24℃，湿度40%で一定に保ち，Fig. 3-5 に示すような膜を挟んだプラスチックホルダー(アドバンテックス社製，PPO-47)と純水を入れた内径が $\phi 16\text{mm}$ の塩ビ管をホースで接続した装置を設置し，レーザー変位計(OMRON 社製，形 ZX1-LD100A61 5M)を用い，実験開始からの水面の変位量を 6 時間測定した．レーザー変位計のサンプリングタイムは 1 分で行い，3 回測定した平均値を結果にまとめた．測定の際，水面の高さを測定するためにアルミホイルを水面に浮かせた．また，実験に使用した純水は実験中に温度が変化しないように 12 時間以上，低温恒温恒湿機内に入れ，水温が安定してから使用した．

使用した膜は Table 3-1 に示すように，材料が PP の PP 不織布とものと，材料が PTFE の PTFE 膜の 2 種類で，それぞれ WBT 値が異なるものを使用した．

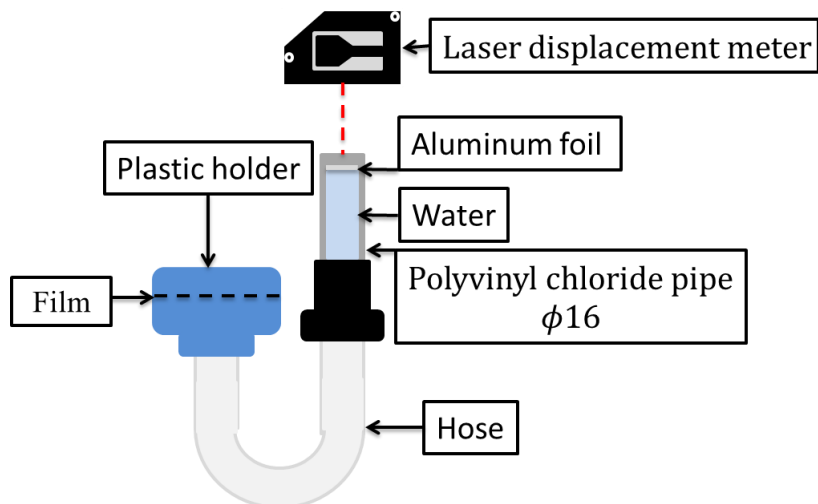


Fig. 3-5 実験装置の概略

Table 3-1 膜の種類

| | PP non-woven fabric | | |
|-----------------------|-------------------------|---------|--------|
| Material | Polypropylene | | |
| WBT[kPa] | 12 | 20 | 44 |
| Film thickness[mm] | 0.0187 | 0.0142 | 0.0291 |
| Area[m ²] | 1.39×10^{-3} | | |
| | PTFE membrane | | |
| Material | Polytetrafluoroethylene | | |
| WBT[kPa] | 50 | 227 | >400 |
| Film thickness[mm] | 0.00513 | 0.00433 | 0.0370 |
| Area[m ²] | 1.39×10^{-3} | | |

3.4. 実験結果

それぞれの膜に対して3回測定し、変位量を平均した経時変化を Fig. 3-6 に示す。すべての膜に対して、水面の変位量が線形的に推移していることから、安定して変位量が測定できたことがわかる。また、それぞれの膜に対して変位量が異なっているため、膜を透過した気化量の違いが確認することができた。膜の材料別では、PTFE 膜の変位量が PP 不織布の変位量より多いという結果になった。

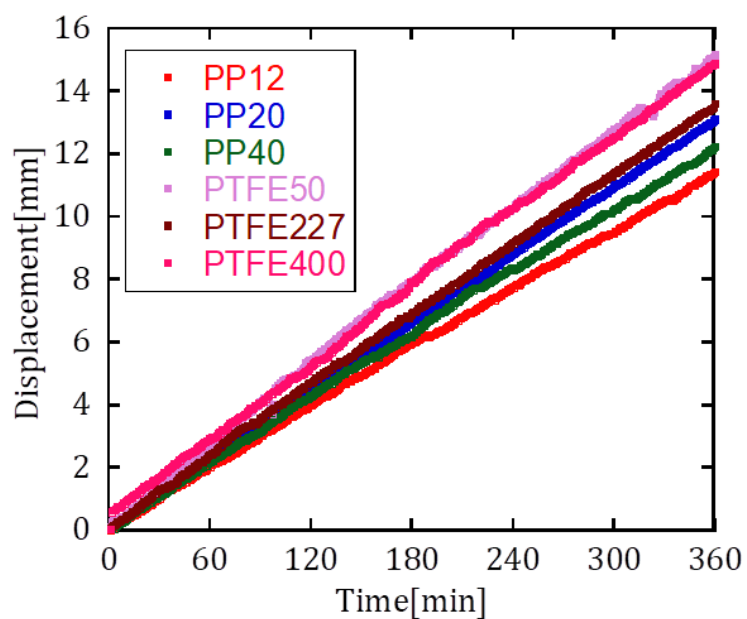


Fig. 3-6 変位量の時間変化

変位量 x [m/min]と気化量 J [g/min]の関係は,

$$J = \frac{\frac{\pi}{4} \rho D^2 x}{A} \quad (3-1)$$

ρ : 密度[g/m³] D : 塩ビ管の内径[m]

A : 透過面積[m²]

のようになる. Fig. 3-6 の結果より毎分当たりの変位量と式(3-1)より求められる気化量を Table 3-2 に示す.

Table 3-2 膜の種類ごとの変位量と気化量

| Type | Displacement [mm/min] | Amount of humidification [g/(h · m ²)] |
|---------|--------------------------|--|
| PP12 | 0.0315 | 272 |
| PP20 | 0.0361 | 312 |
| PP44 | 0.0337 | 291 |
| PTFE50 | 0.0416 | 359 |
| PTFE227 | 0.0374 | 323 |
| PTFE400 | 0.0403 | 348 |

3.5. 考察

レーザー変位計を用いて測定した気化量から膜内の単位厚さ当たりの拡散係数を求める. 前章より膜内の拡散係数と膜内の単位厚さ当たりの拡散係数は,

$$D_m = \frac{L_m}{L} \frac{J_m D}{J - J_m} \quad (3-2)$$

$$\frac{D_m}{L_m} = \frac{1}{L} \frac{J_m D}{J - J_m} \quad (3-3)$$

のように表される. Table 3-2 の結果と式(3-2) , (3-3)より膜内の拡散係数を Fig. 3-7 に, 膜内の単位厚さ当たりの拡散係数を Fig. 3-8 に, 膜内の単位厚さ当たりの拡散係数と気化量の相関性を Fig. 3-9 に示す. 膜内の拡散係数は気化量と関係性がみられなかったが加湿特性を表す膜内の単位厚さ当たりの拡散係数と気化量に関しては相関性を得ることができた. また, レーザー変位計を用いることで低温恒温恒湿機内の環境を安定した状態で気化量を計測できたため, 膜内の単位厚さ当たりの拡散係数を求める際には, 密閉状態でレーザー変位計を用いた気化量から求める方法が適していると言える.

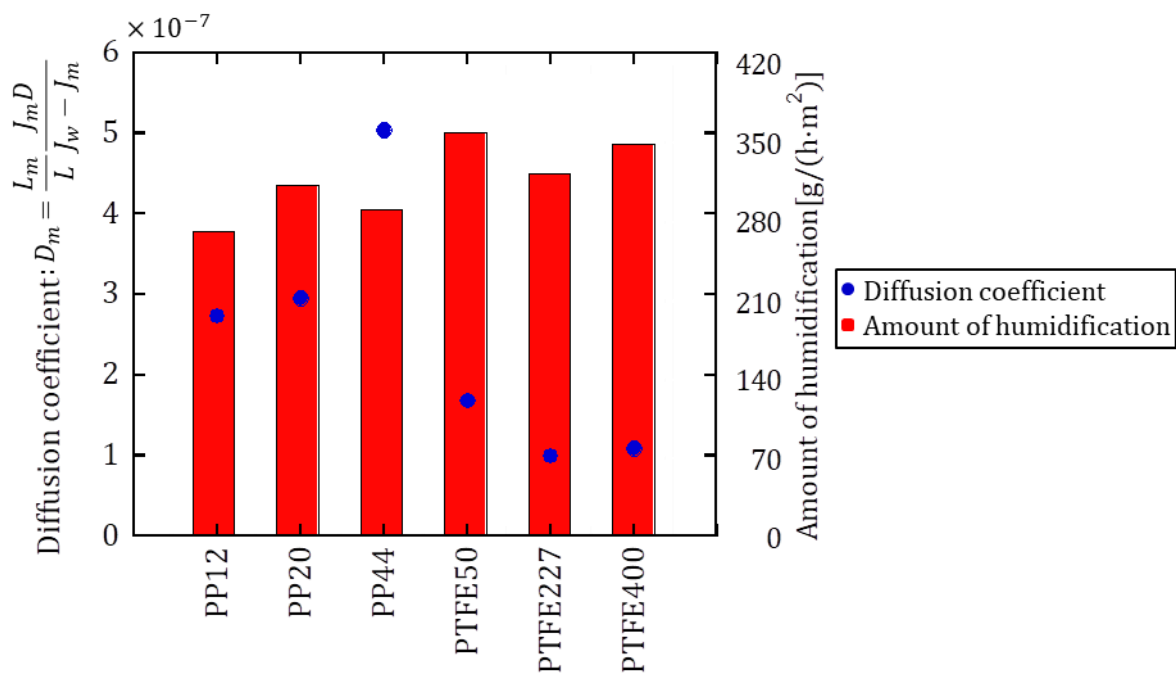


Fig. 3-7 膜内の拡散係数と気化量の比較

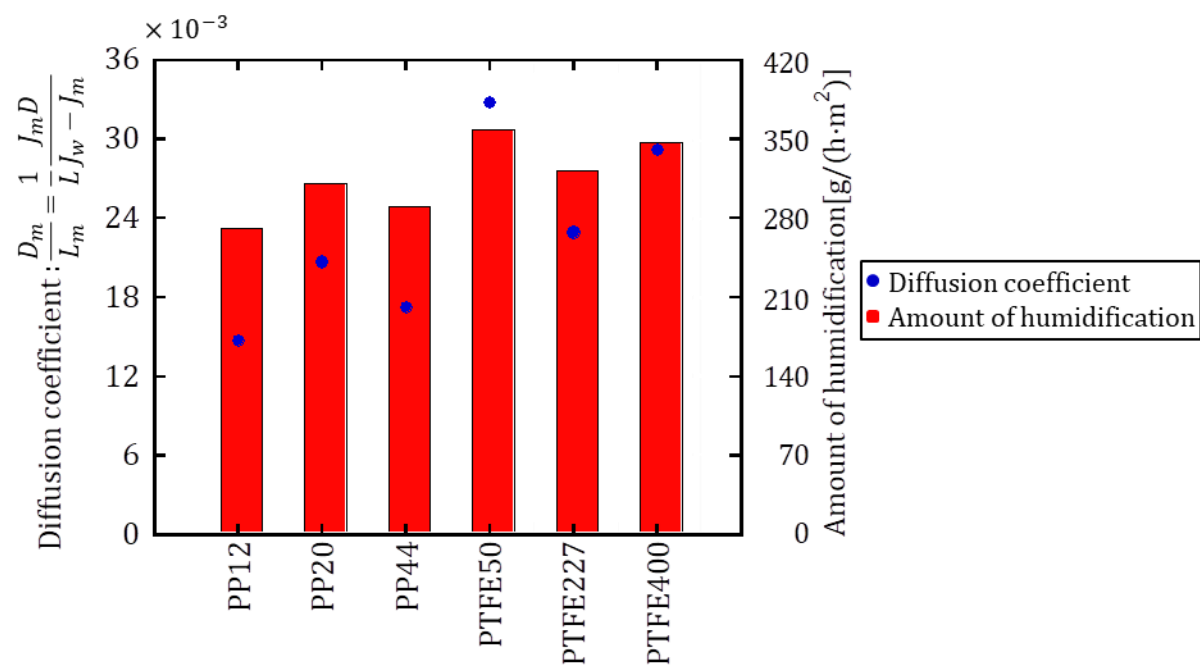


Fig. 3-8 膜内の単位厚さ当たりの拡散係数と気化量の比較

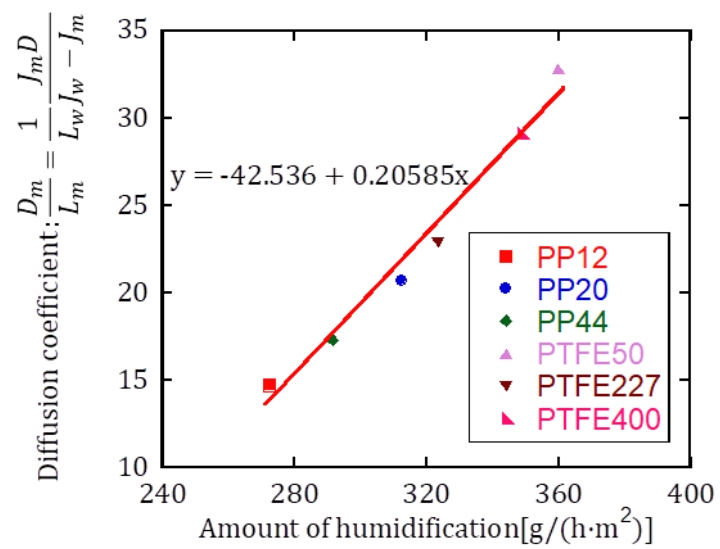


Fig. 3-9 膜内の単位厚さ当たりの拡散係数と気化量の相関性

第4章 乱流状態が及ぼす気化量への影響

4.1. 実験目的

気化式加湿器は空気の温度が高くなると気化量は多くなり、湿度が高くなると気化量は少なくなる。また、加湿ユニットに流入する空気の風速が早くなると気化量は多くなることがわかっている。しかし、気化式加湿器の加湿ユニットに流入する空気の乱流状態がどのように気化量へどのような影響を及ぼすかは明確にはなっていないが、乱流の重要な特徴の一つとして拡散性がある。この特徴により乱流は、単位時間当たりの分子の輸送量が増えることが分かっている⁷⁾。そこで、3章で膜内の単位厚さ当たりの拡散係数の値がよかった PTFE 膜を用いた加湿ユニットに対して流入する空気の乱流状態がどのように気化量へ影響を及ぼすかを調べた。

4.2. 実験装置

実験装置の概略を Fig. 4-1 に、装置の流入口の形状を Fig4-2 に示す。厚さ 1mm のステンレスを用いた長さ 1000 mm、高さ 372 mm、幅 324 mm のダクト内に仕切り板として厚さ 3mm のアクリル板を装置内部に設置することで、同一環境下でダクト内に 2 種類の異なる乱流状態が得られるようにし、装置の中央に加湿ユニット(GORE-TEX 社製, IMH-330)を設置した。シロッコファンはファンモーター(三相電機社製, CRC4456AZ)と、ファン(東プレ社製, DDWA16-20-φ12)ファンケース(東プレ社製, DH16-20)を使用した。シロッコファンへ空気が流入する風量を風量計(カノマックス社製, Model 6710)で測定した結果は 282 m³/hであった。また、装置の流入口にはメッシュ数が 10 のステンレスメッシュを設置した。このときの流入口における格子レイノルズ数 Re_M は

$$Re_M = \frac{U_\infty M}{\nu} \quad (4-1)$$

U_∞ : 入口流速[m/s]

M : 格子長さ[m]

ν : 動粘度 (=1.50 × 10⁻⁵ [m²/s])

より $Re_M = 635.9$ となる。

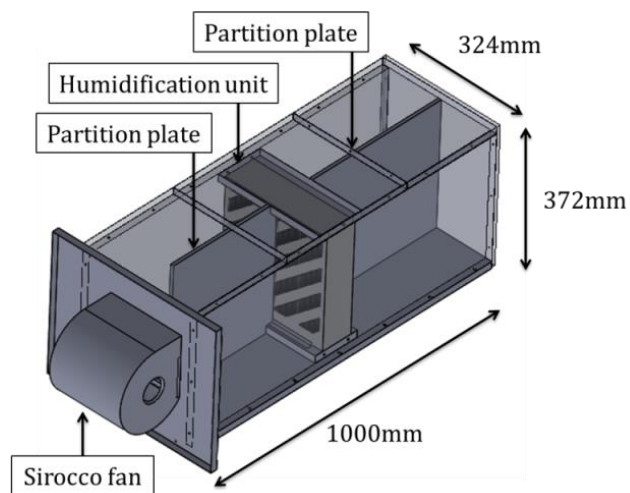


Fig. 4-1 実験装置の概略

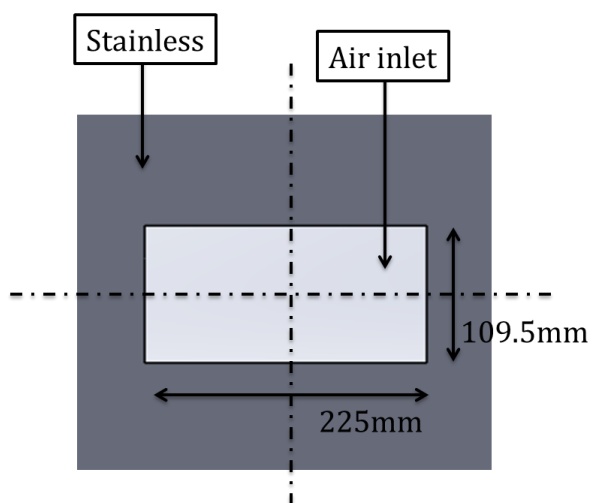


Fig. 4-2 流入口の形状

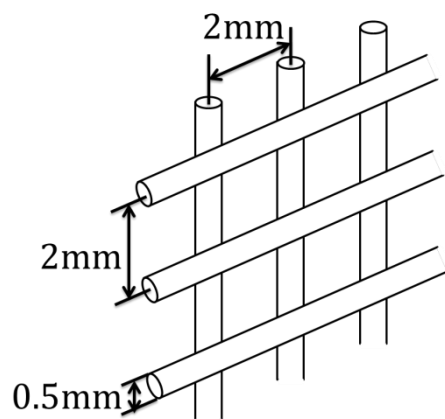


Fig. 4-3 ステンレスメッシュの寸法

4.3. 実験装置内の空気の流れの可視化

4.3.1. 実験方法

実験装置の概略を Fig. 4-4 に、実験右側面からの概略を Fig. 4-5 に、ニクロム線の固定台を Fig. 4-6 に示す。実験装置は上面から装置内部を確認できるように、Fig. 4-1 の実験装置の上面をステンレスから厚さ 5 mm のポリカーボネート板に変更した。また、空気の流入口から 345 mm のところにニクロム線を設置し、ニクロム線から 15mm のところに円柱を設置した。そして、スモークワイヤー発生装置(菅原研究所社製, MS-405)によりニクロム線からスモークを発生させ、装置上面からハイスピードカメラ(シナノケンシ社製, PL2-CHCSX) でスモークによる空気の流れを確認した。ハイスピードカメラは 2000fps で撮影し、使用した円柱の直径は $\phi 6$, 18, 22 mmの 3 種類を用いた。Fig. 4-6 に示すニクロム線の固定台は 30×30 mm のアルミフレームを使用しニクロム線は穴をあけたポリカーボネート板に巻き付けることで固定した。

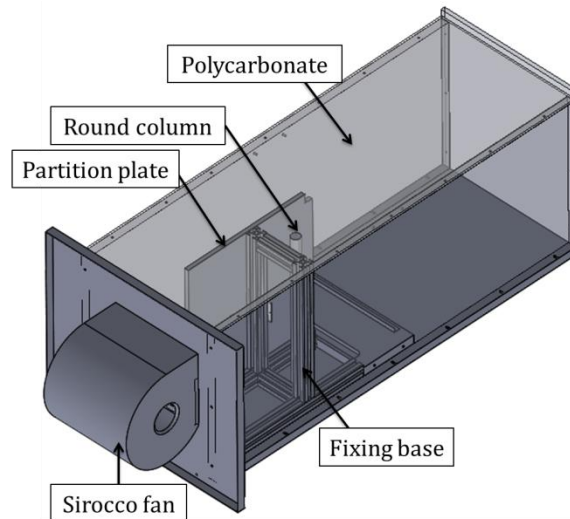


Fig. 4-4 実験装置の概略

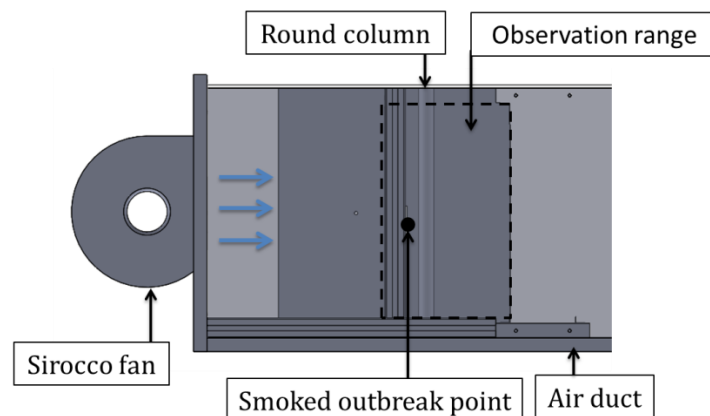


Fig. 4-5 実験右側面の概略

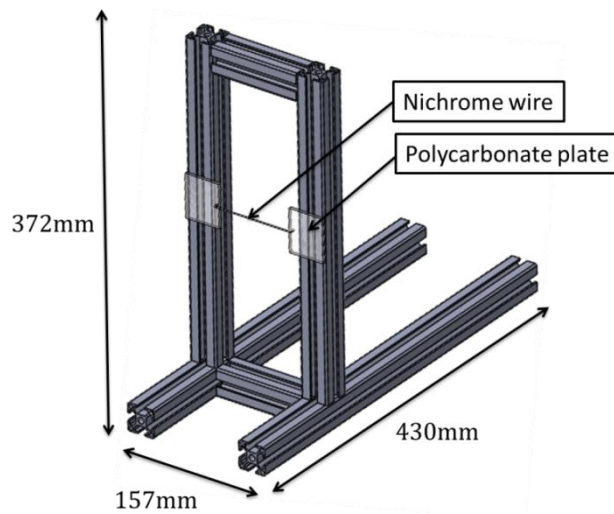


Fig. 4-6 ニクロム線の固定台

4.3.2. 実験結果

設置した円柱の直径 $\phi 6$, 18 , 22 mm それぞれの実験結果を Fig. 4-7, Fig. 4-8, Fig. 4-9 に示す. $\phi 6$ mm のとき, 空気は円柱を回り込み後方に流れた. $\phi 18$ mm のとき, 円柱後方で渦が発生することを確認できた. $\phi 22$ mm のとき, 空気は円柱で剥離することを確認できた. 実験で使用した 3 本の円柱はそれぞれ, 異なる空気の流れが生じることを確認できたため, この 3 種類の異なる空気の流れから加湿ユニットに流入する空気の乱流状態と気化量の関係性を調べる.

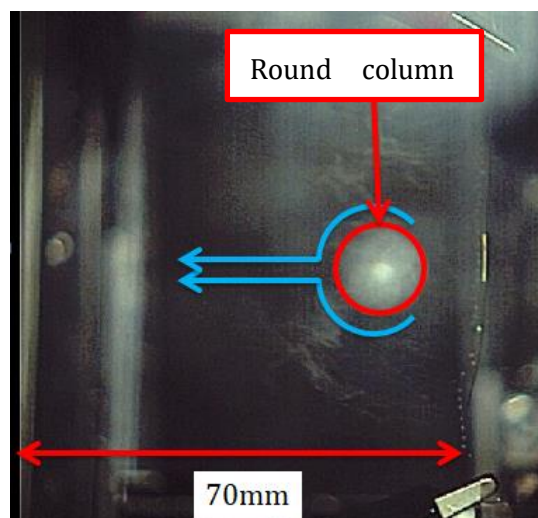


Fig. 4-7 $\phi 6$ の実験結果

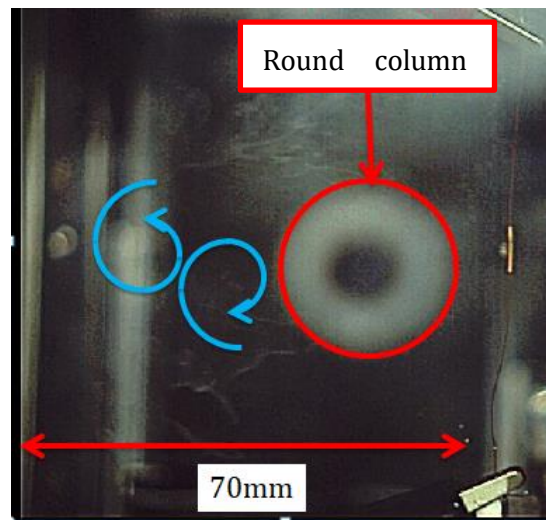


Fig. 4-8 $\phi 18$ の実験結果

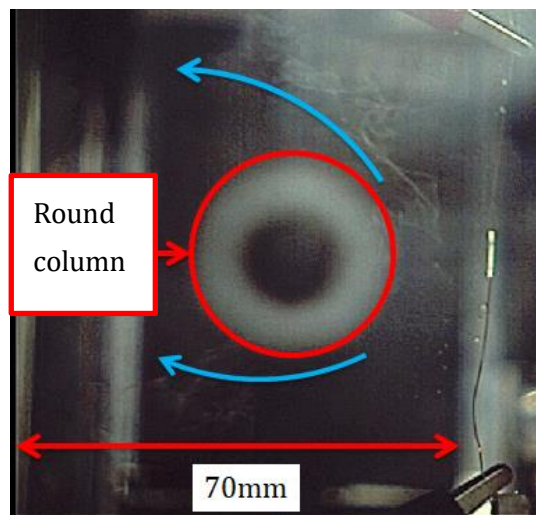


Fig. 4-9 $\phi 22$ の実験結果

4.4. 乱流状態による変化

4.4.1. 実験方法

実験装置の概略を Fig4-10 に示す．空気の流入口から見て右側に円柱を水平に設置した．設置位置は加湿ユニットから前方に距離 $L=5, 10, 15\text{ mm}$ の位置に円柱を設置し，使用した円柱の直径は $\phi 6, 18, 22\text{ mm}$ の 3 種類を使用した．シロッコファンに空気が流入する前と加湿ユニットを通過した後の左右両方に温湿度計(ティアンドデイ社製, TR-76Ui)を設置し, 円柱を設置した 9 個の条件と円柱を設置しなかった場合で湿度と温度を 3 回測定した．測定時間は 4 時間で，サンプリングタイムは 1 分で行った．

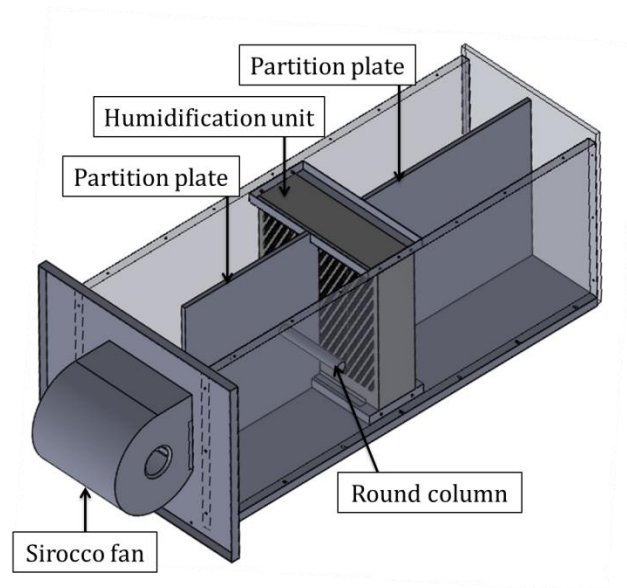


Fig. 4-10 実験装置の概略

4.4.2. 実験結果

円柱を設置しなかった場合の湿度と温度を Fig. 4-11 に， $\phi 6\text{ mm}$ の円柱を設置した場合の湿度と温度を Fig. 4-12~Fig. 4-14， $\phi 18\text{ mm}$ の円柱を設置した場合の湿度と温度を Fig. 4-15~Fig. 4-17， $\phi 18\text{ mm}$ の円柱を設置した場合の温度と湿度を Fig. 4-18~Fig. 4-20 に示す．すべての実験結果より実験開始 1 時間は温度，湿度ともに安定していないため 1 時間以降の値が有効と考え，Fig. 4-11 の装置内左右の湿度差とその平均値を Table4-1 に，Fig. 4-12~Fig.4-20 の円柱の有無による湿度差とその平均値を Table4-2 に示す．Fig. 4-11 より装置の右側が平均して 4.33%湿度が高くなった．Fig. 4-12~Fig.4-20 より円柱を設置した装置右側が円柱を設置しなかった左側より湿度が高くなった．Table4-1 と Table4-2 の湿度差の平均値を比較すると円柱設置することで装置内の湿度差がさらに大きくなったことがわかる．また，すべての条件に対して加湿ユニットを通過することで温度が低くなる傾向が得られ，装置内の左右で比較した際も円柱を設置した右側の温度が低くなる傾向が得られた．この傾向については，水が気化する際の気化熱により温度が低下したものであり，温度の結果からも円柱を設置した側の気化量が多いことがわかった．

Table4-1 装置内の湿度差

| | Humidity difference[%] | Average [%] |
|--------|---------------------------|----------------|
| First | 3.01 | 4.33 |
| Second | 5.86 | |
| Third | 4.11 | |

Table4-2 円柱の有無による湿度差

| | | 5mm | | 10mm | | 15mm | |
|-----------|--------|---------------------------|----------------|---------------------------|----------------|---------------------------|----------------|
| | | Humidity difference[%] | Average [%] | Humidity difference[%] | Average [%] | Humidity difference[%] | Average [%] |
| $\phi 6$ | First | 6.74 | 6.95 | 4.99 | 4.66 | 5.09 | 5.04 |
| | Second | 7.04 | | 4.94 | | 5.09 | |
| | Third | 7.06 | | 4.04 | | 4.94 | |
| $\phi 18$ | First | 8.78 | 8.32 | 5.14 | 6.05 | 5.91 | 5.30 |
| | Second | 9.09 | | 6.92 | | 5.00 | |
| | Third | 7.09 | | 6.08 | | 4.98 | |
| $\phi 22$ | First | 10.08 | 9.82 | 8.80 | 8.62 | 5.67 | 6.76 |
| | Second | 9.90 | | 8.26 | | 7.76 | |
| | Third | 9.48 | | 8.79 | | 6.84 | |

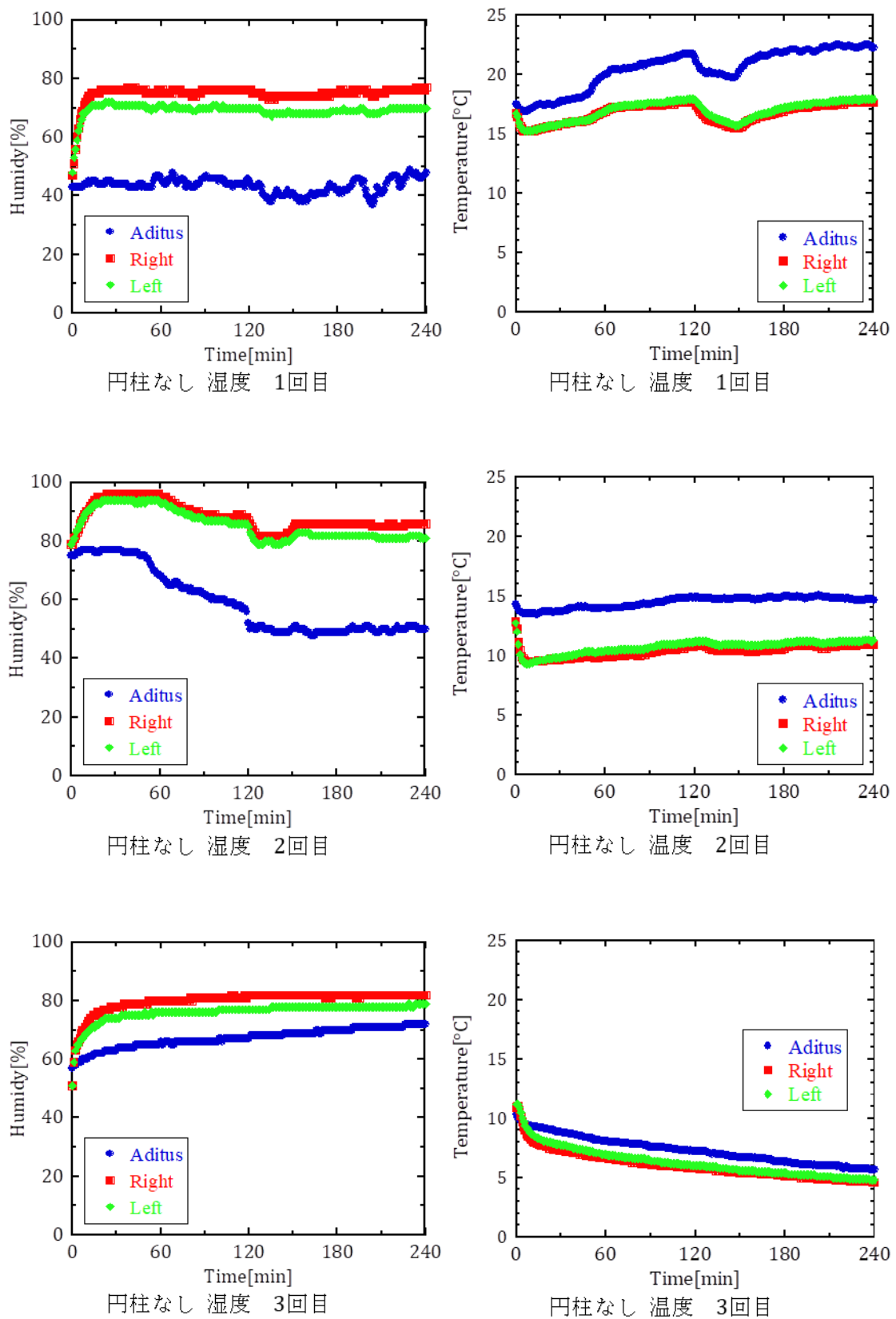


Fig. 4-11 装置内の湿度と温度

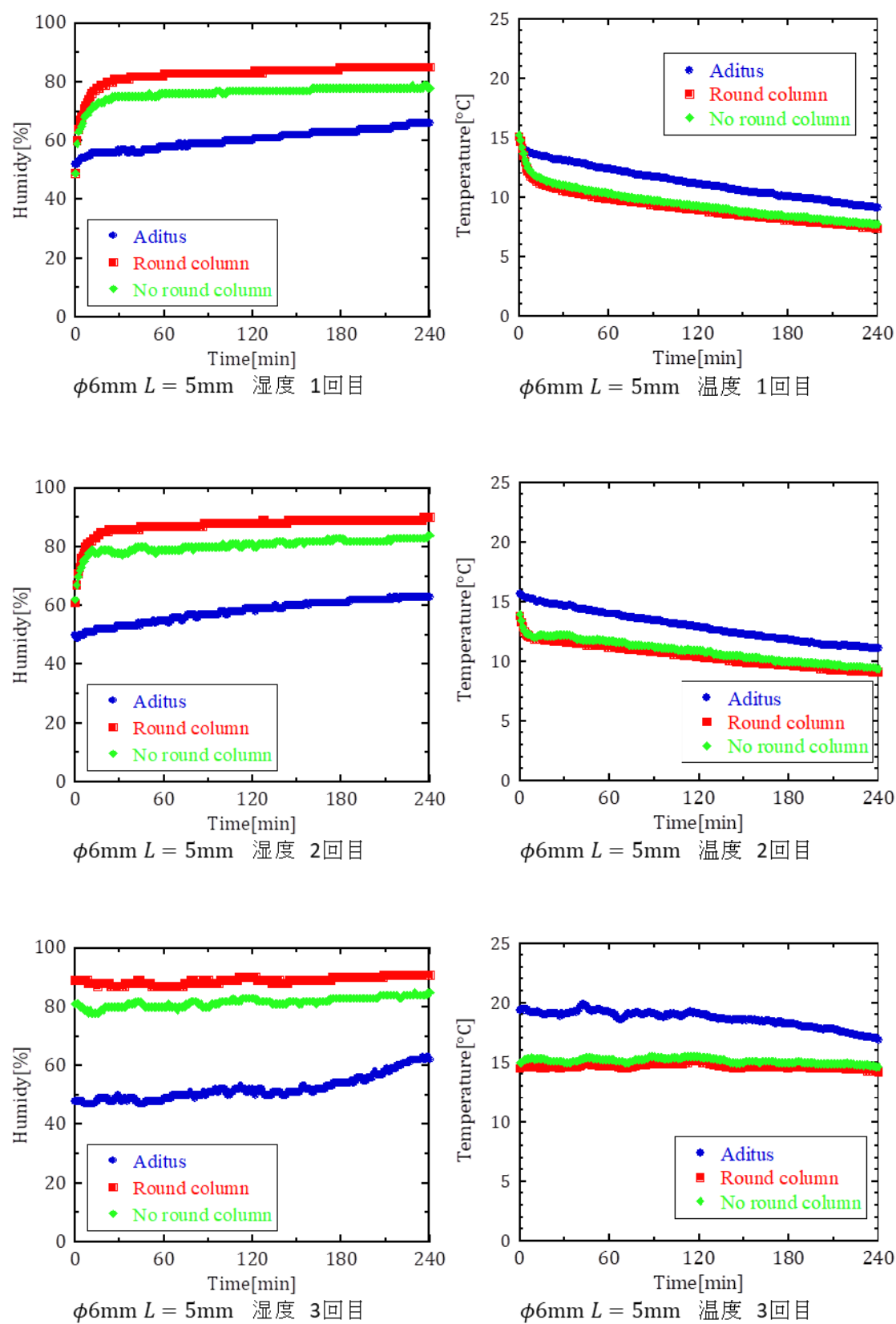


Fig. 4-12 $\phi 6\text{mm}$, $L = 5\text{mm}$ のときの湿度と温度

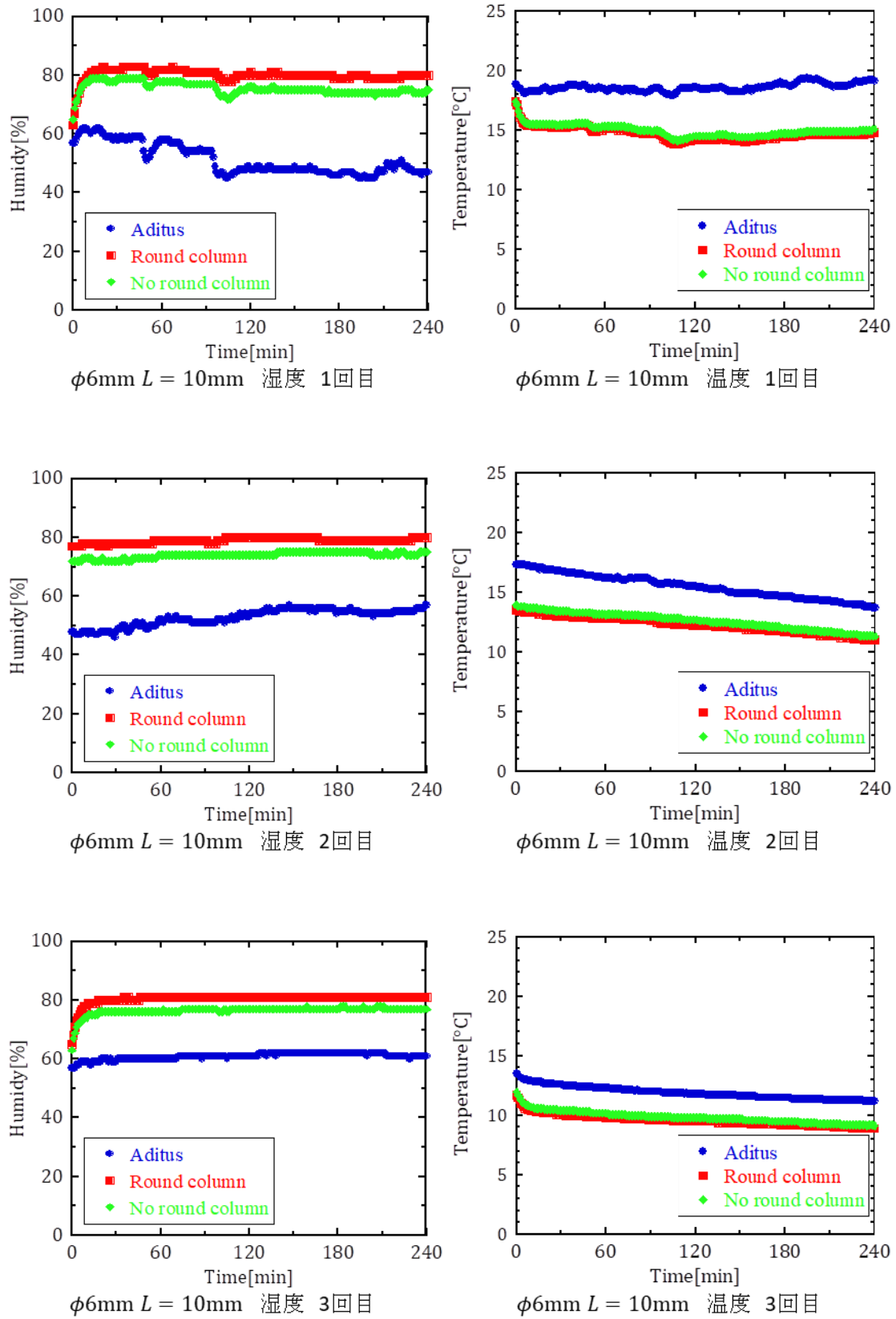


Fig. 4-13 $\phi 6\text{mm}$, $L = 10\text{mm}$ のときの湿度と温度

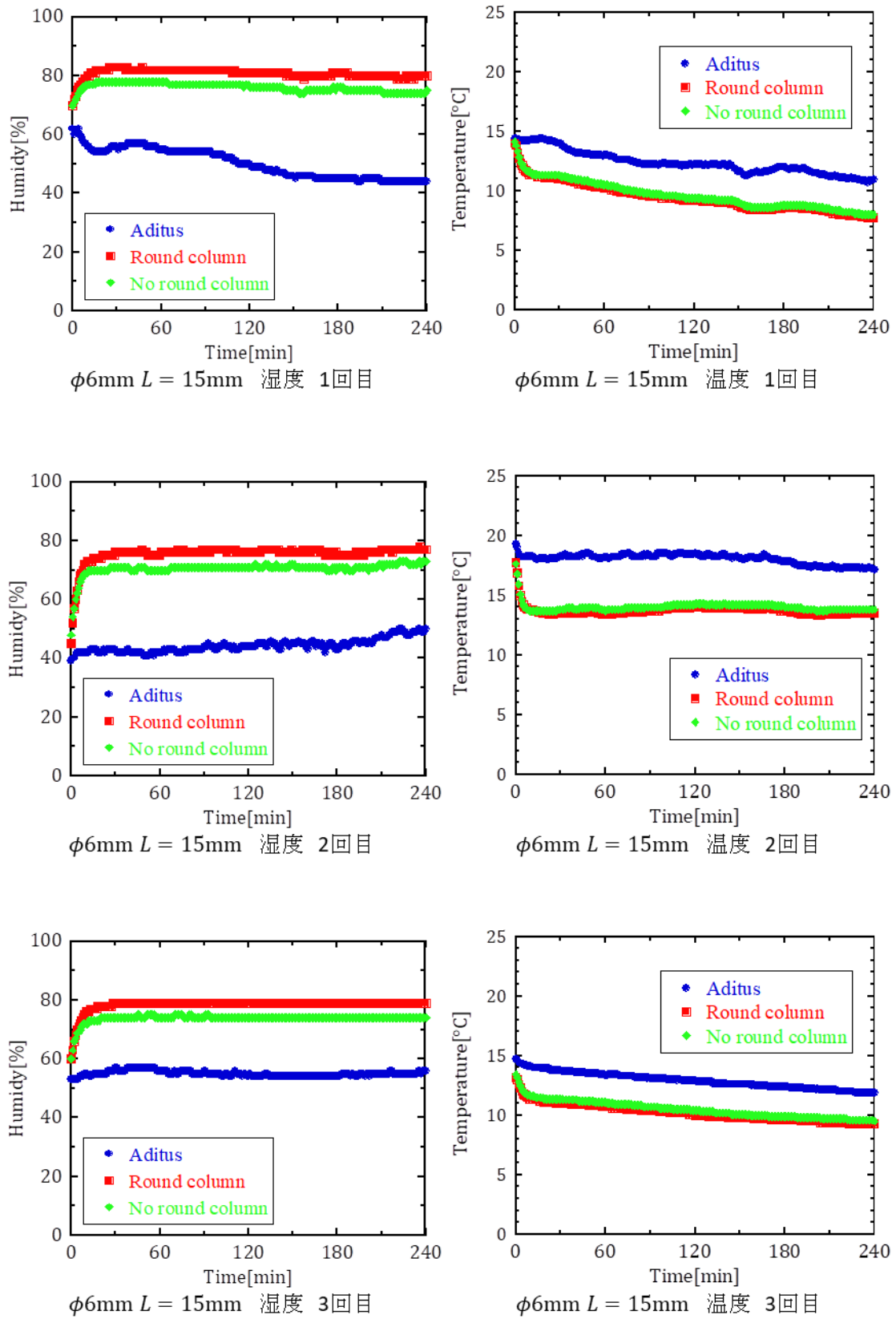


Fig. 4-14 $\phi 6\text{mm}$, $L = 15\text{mm}$ のときの湿度と温度

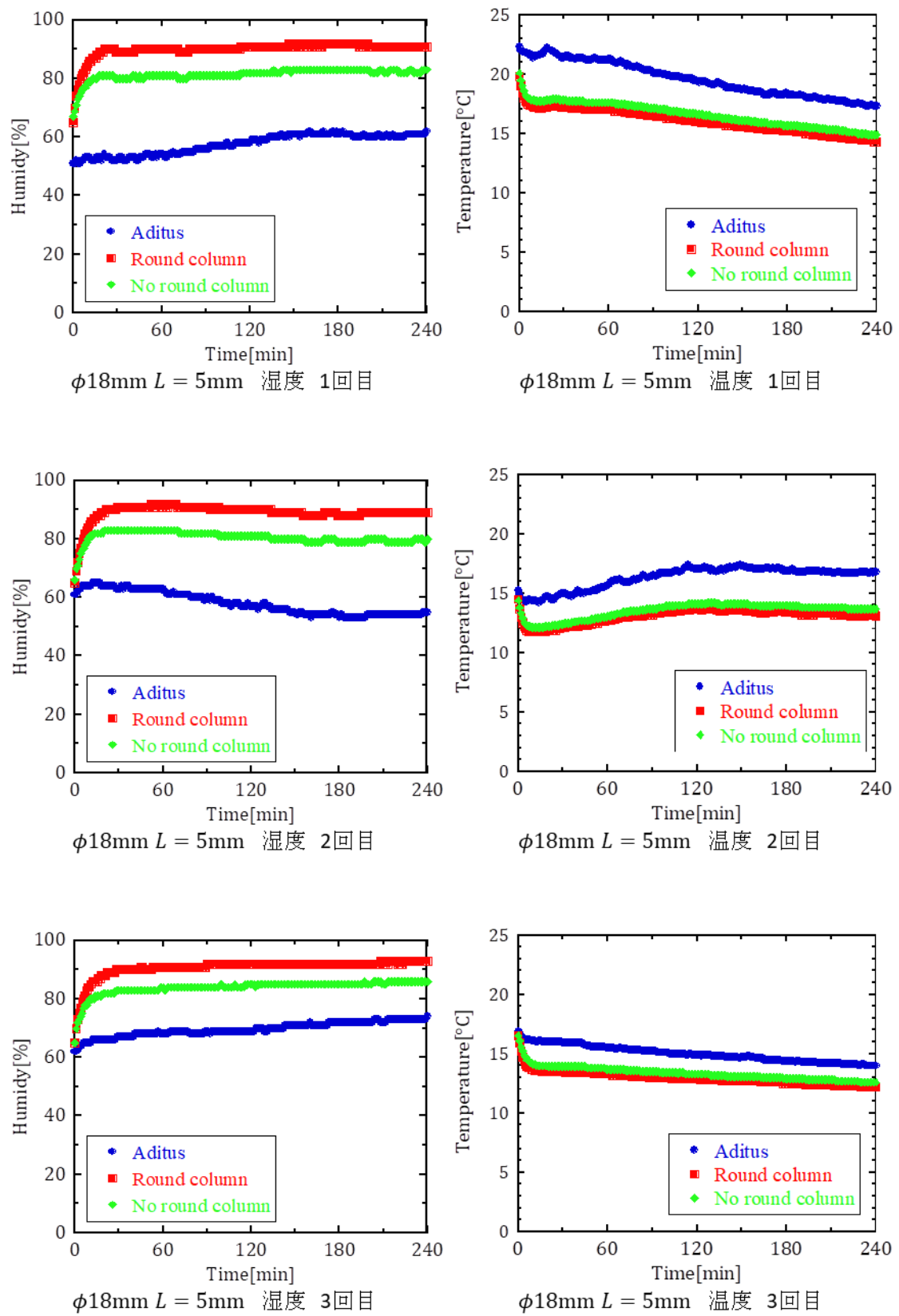


Fig. 4-15 $\phi 18\text{mm}$, $L = 5\text{mm}$ のときの湿度と温度

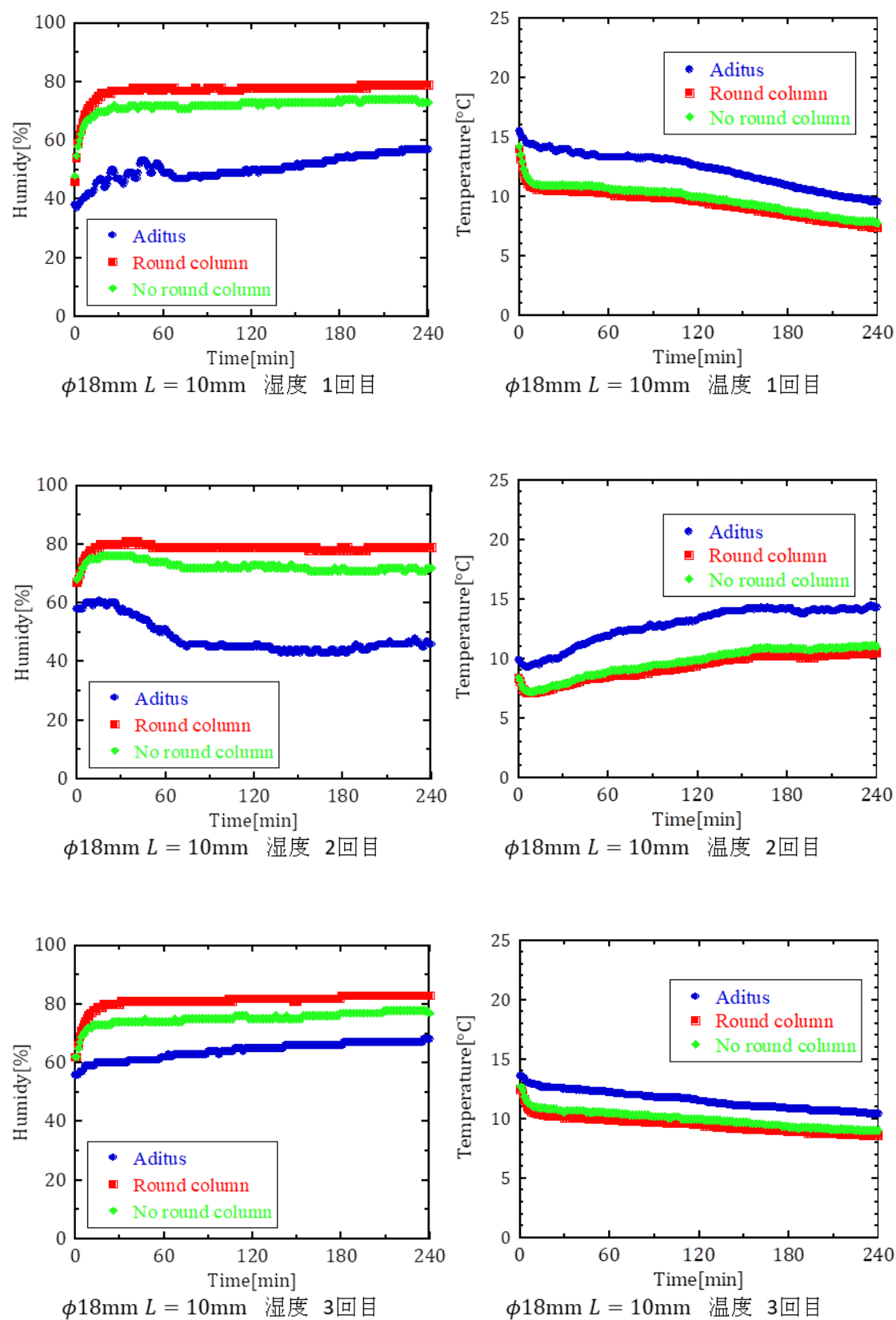


Fig. 4-16 $\phi 18\text{mm}$, $L = 10\text{mm}$ のときの湿度と温度

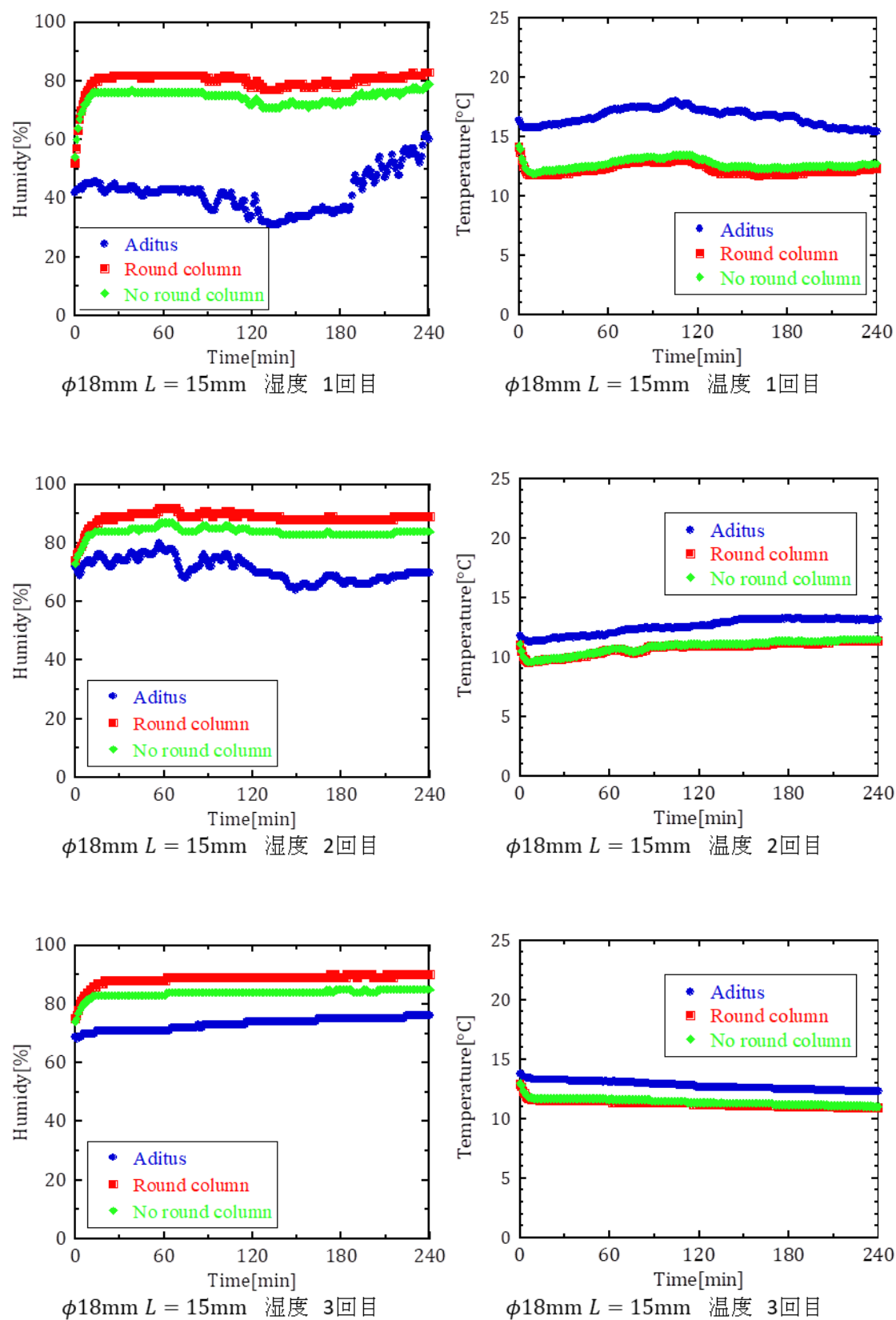


Fig. 4-17 $\phi 18\text{mm}$, $L = 15\text{mm}$ のときの湿度と温度

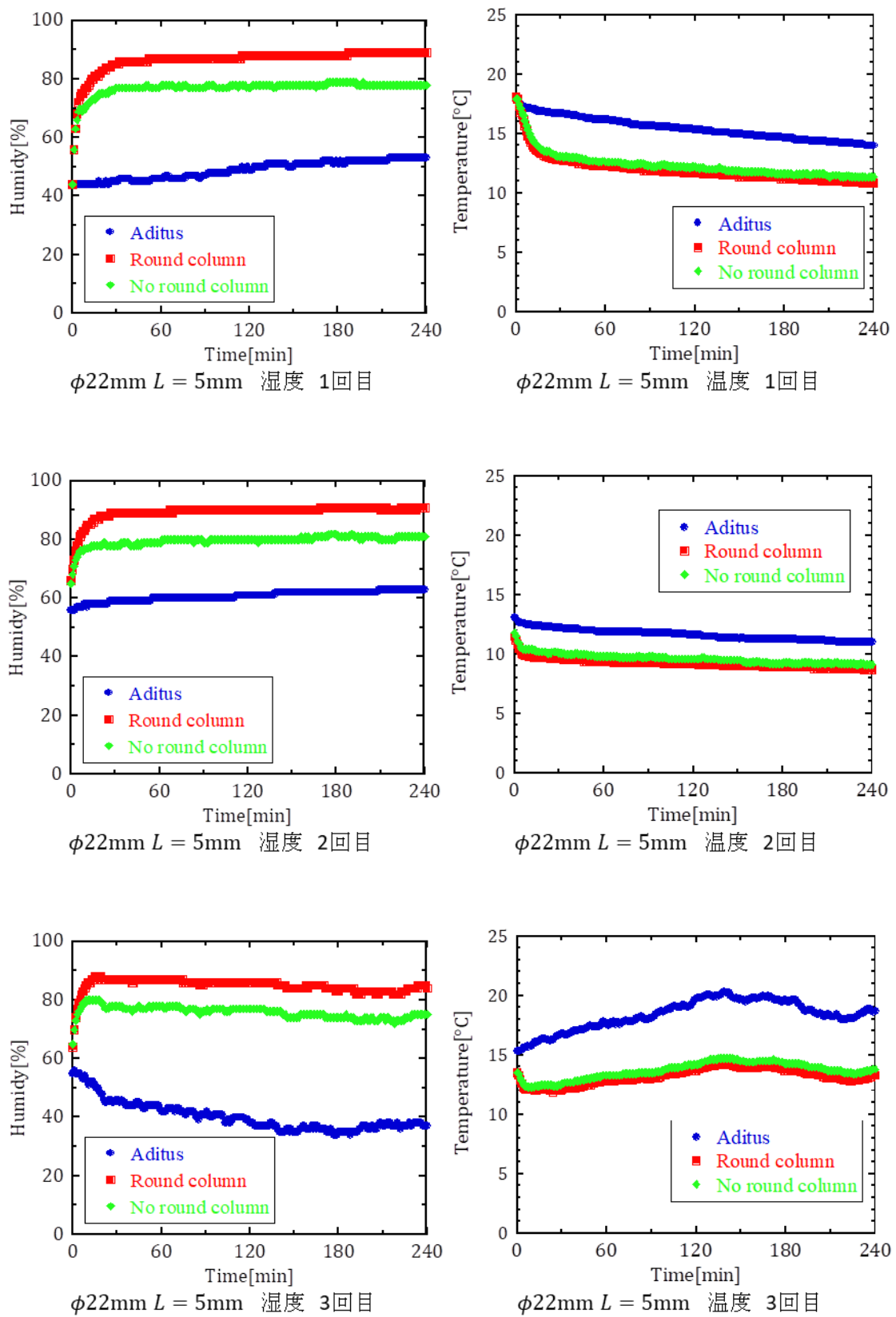


Fig. 4-18 $\phi 22\text{mm}$, $L = 5\text{mm}$ のときの湿度と温度

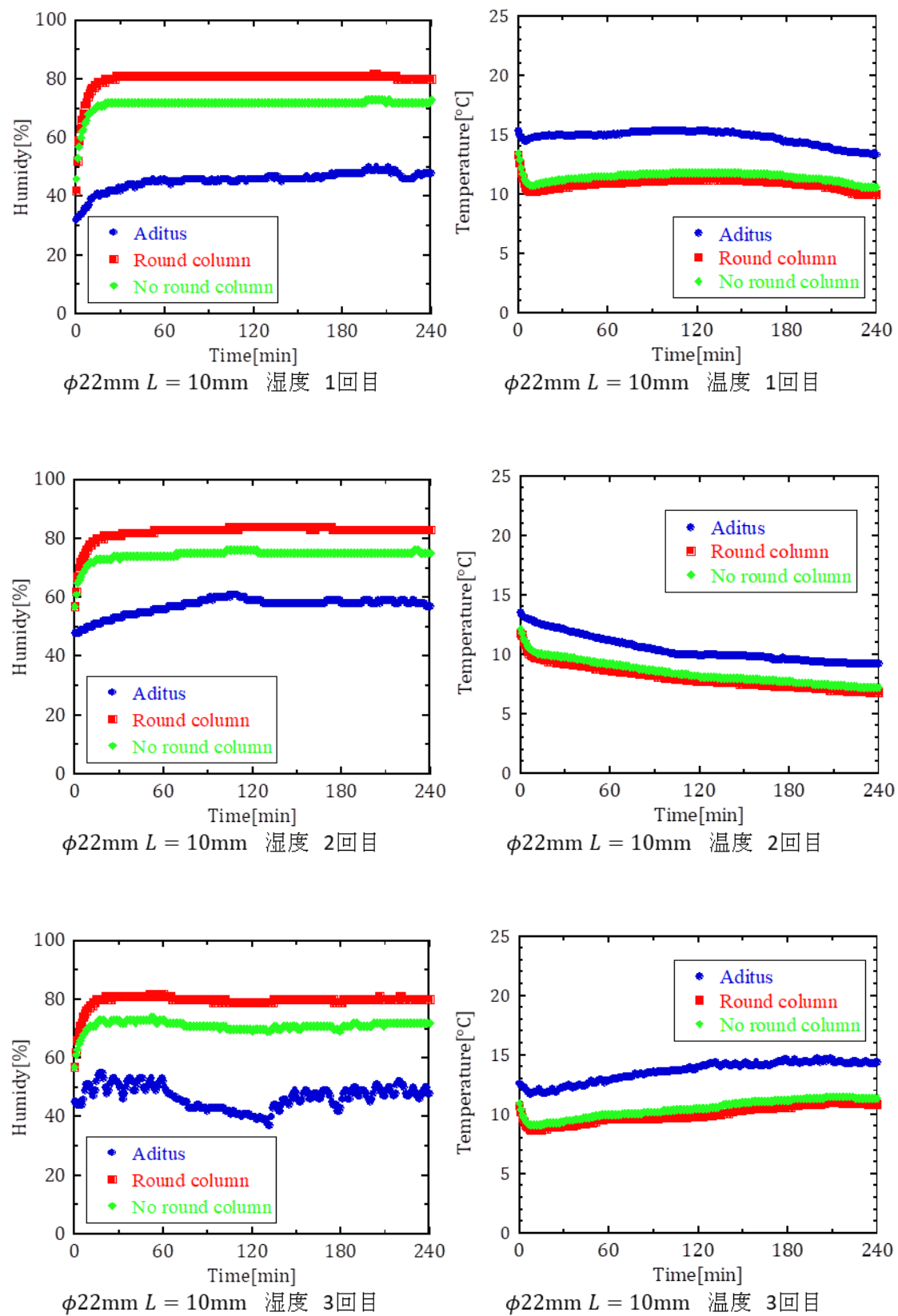


Fig. 4-19 $\phi 22\text{mm}$, $L = 10\text{mm}$ のときの湿度と温度

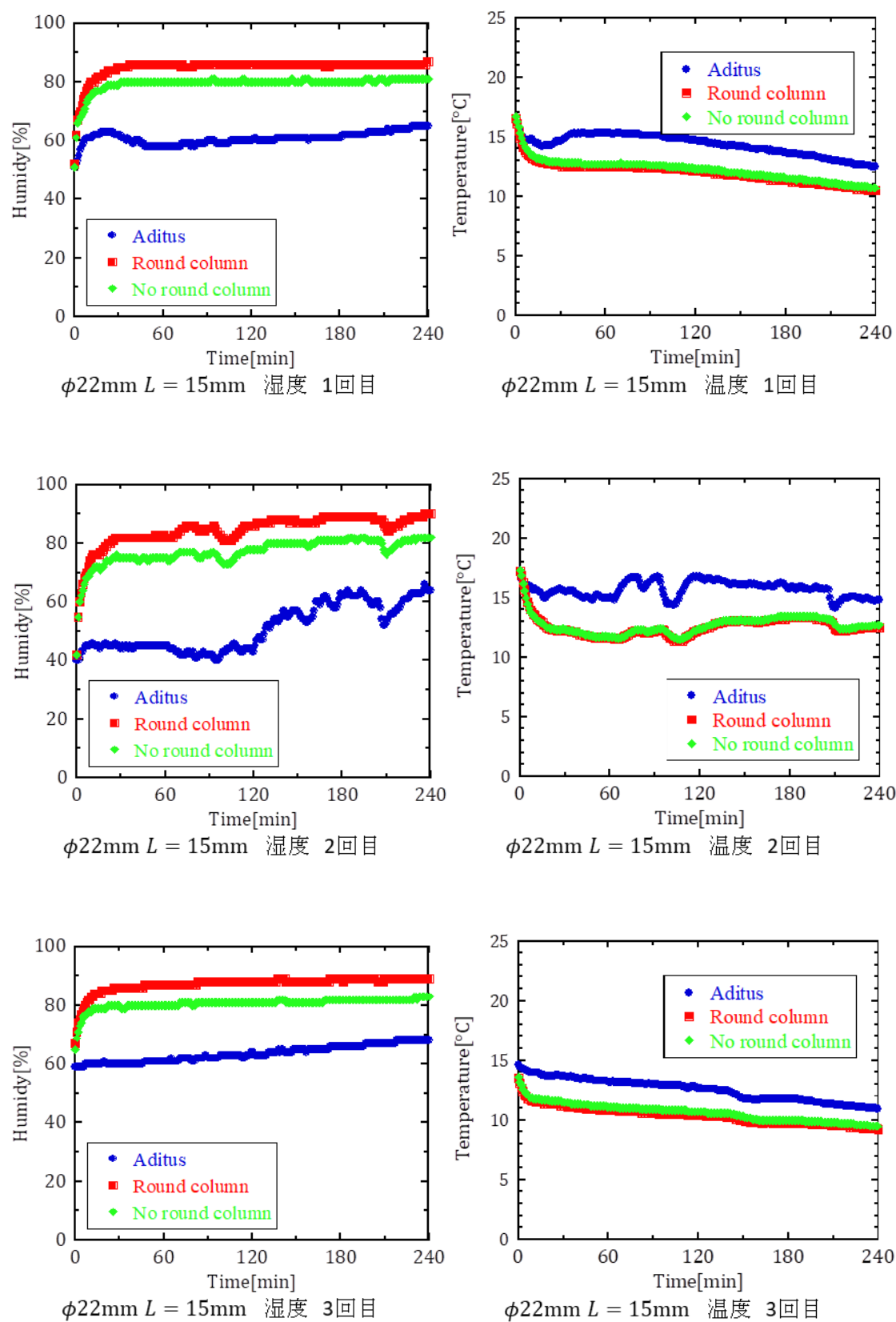


Fig. 4-20 $\phi 22\text{mm}$, $L = 15\text{mm}$ のときの湿度と温度

4.5. 考察

実験結果より円柱の有無による湿度差から装置内の湿度差を引くことで円柱を設置したことによる正味の湿度差を Table4-3 に示す。また、円柱の直径による湿度差の変化を Fig. 4-21, 加湿ユニットから円柱までの距離による湿度差の変化を Fig. 4-22 に示す。Fig. 4-21 より、円柱の直径が大きくなると気化量の差が指数関数的に上昇した。また Fig. 4-22, より円柱が加湿ユニットから離れると線形的に湿度差が小さくなり、湿度差が 1% 付近になると差が変化しなくなった。

Table4-3 円柱設置による正味の湿度差

| | | 5mm | | 10mm | | 15mm | |
|--------------------|--------|------------------------|-------------|------------------------|-------------|------------------------|-------------|
| | | Humidity difference[%] | Average [%] | Humidity difference[%] | Average [%] | Humidity difference[%] | Average [%] |
| $\phi 6\text{mm}$ | First | 2.41 | 2.62 | 0.663 | 0.330 | 0.763 | 0.713 |
| | Second | 2.71 | | 0.613 | | 0.763 | |
| | Third | 2.73 | | -0.287 | | 0.613 | |
| $\phi 18\text{mm}$ | First | 4.45 | 3.99 | 0.813 | 1.72 | 1.58 | 0.970 |
| | Second | 4.76 | | 2.59 | | 0.673 | |
| | Third | 2.76 | | 1.75 | | 0.653 | |
| $\phi 22\text{mm}$ | First | 5.75 | 5.49 | 4.47 | 4.29 | 1.34 | 2.43 |
| | Second | 5.57 | | 3.93 | | 3.43 | |
| | Third | 5.15 | | 4.46 | | 2.51 | |

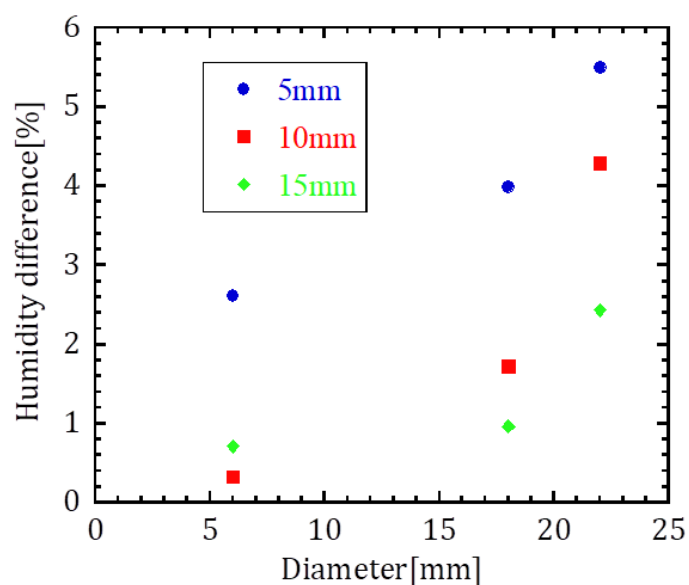


Fig.4-21 円柱の直径による湿度差の変化

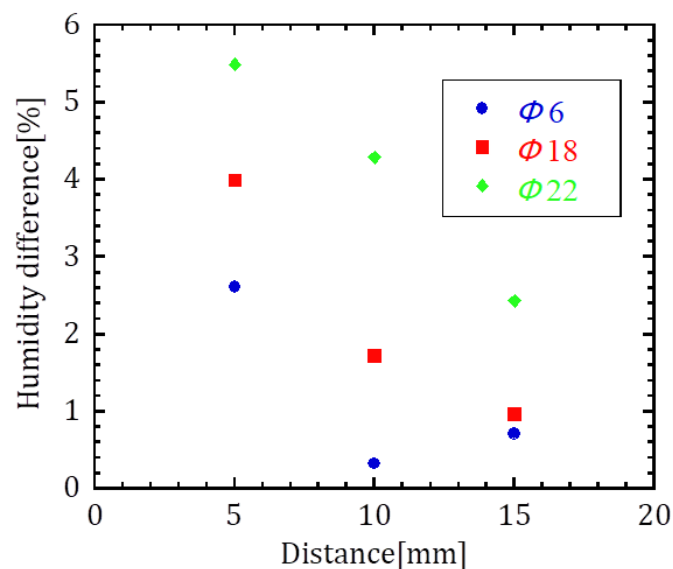


Fig.4-22 加湿ユニットからの距離による湿度差の変化

円柱の直径と加湿ユニットまでの距離によって湿度差が変化するためそれぞれが気化量と関係があると考えられる。そこで、円柱の直径 D [m]を加湿ユニットまでの距離 L [m]で割った値と気化量の差の関係性を Fig.4-23 に示す。 D/L は湿度差と相関性がみられた。線形近似の結果より円柱を用いることで増加する湿度 y [%]は、

$$y = 1.1963 \frac{D}{L} + 0.2647 \quad (4-1)$$

のように表すことができる。このことより、円柱による乱流状態の変化が気化量に影響を及ぼすことが分かった。

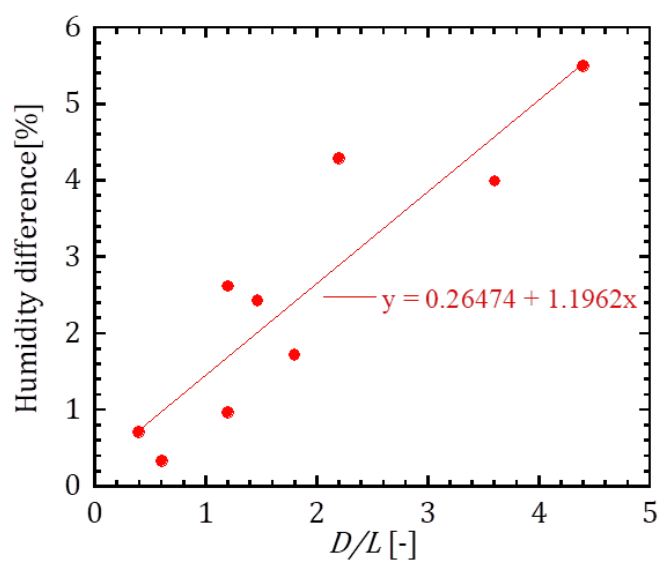


Fig.4-23 湿度差と L/D の相関性

第5章 結言

本研究では、気化式加湿器に適した条件を見つけることを最終目的とし、まず気化式加湿器に使用される膜の気化特性を表す係数を求めることを行った。実験は温度と湿度を一定に保つために低温恒温恒湿機を用い、実験中、低温恒温恒湿機内は強制対流により温度と湿度を一定に保っているため、水蒸気の拡散層厚さは強制対流の影響により変化しないものとする。気化特性を表す係数を求めるために膜を透過した気化量を測定し、フィックの法則より導き出した膜内の拡散係数を求めたが、膜内の拡散係数と膜を透過した気化量に相関性がみられなかった。ここで、膜内の拡散係数を求める式に着目すると式内に膜の厚みが存在している。しかし、実験で用いた膜はそれぞれ厚みが異なることから、膜内の拡散係数を膜の厚みで割った膜内の単位厚さ当たりの拡散係数に直して膜を用いた際の気化量と比較した。その結果、膜内の単位厚さ当たりの拡散係数は気化量と相関性が得られたため、膜の気化特性を表す係数として膜内の単位厚さ当たりの拡散係数が用いられることが分かった。

膜内の単位厚さ当たりの拡散係数を求める際に膜を透過した気化量の測定が必要となる。しかし、第2章で行った実験では安定した気化量の測定が行えていなかった。そこで、膜の気化的特性を表す膜内の単位厚さ当たりの拡散係数を正確に求めるため、安定的な膜を透過した気化量の測定方法について検討を行った。第2章では気化量の測定方法を質量差から求めていたが、測定時に低温恒温恒湿機の扉を開閉したため膜の周囲環境が変化し、一定に保つことができていなかった。そのため、密閉状態での膜からの気化量を測定する必要があると考え水面の変位量を測定した。水面の変位量から膜を透過した気化量を求め、膜内の単位厚さ当たりの拡散係数を求めた。水面の変位量から求めた膜からの気化量は安定的に求めることができおり、膜内の単位厚さ当たりの拡散係数と膜を透過した気化量は相関性を得られた。このことから、水面の変位量から求める膜内の単位厚さ拡散係数は膜の気化特性を求める方法として有用であることが分かった。

次に、膜内の単位厚さ当たりの拡散係数の値が優れていた PTFE 膜を使用した加湿ユニットに対して流入する空気の乱流状態が気化量に及ぼす影響を調べた。シロッコファン設置したダクト内に乱流状態の異なる三種類の円柱の選定を行い、それぞれの円柱を設置した際の湿度差を測定した。測定結果より円柱を設置した側の湿度が円柱を設置しなかった側の湿度より高くなった。円柱の有無による湿度差と円柱の直径には相関性がみられ、円柱と加湿ユニットまでの距離と湿度差には指数関数的な傾向を見ることができた。このことから、円柱と加湿ユニットまでの距離と円柱の直径が気化量増加と相関性があると考えられる。そこで、円柱の直径 D を加湿ユニットと円柱の距離 L で割った値 D/L と湿度差の相関性を見たところ相関性が得られた。このことから、装置内で円柱による乱流状態の変化が気化量に及ぼす影響を確認することができた。

参考文献

- 1) Anice C.Lowen, Samira Mubareka, John Steel, Peter Palese. Influenza Virus Transmission Is Dependent on Relative Humidity and Tempreture(2007)
- 2) 栃原裕, 他. 人工環境デザインハンドブック, 丸善, 36(2007)
- 3) 同上
- 4) 飯田望, 他. 健康に住まう家づくり, オーム, 5(2004)
- 5) 上田 政文, 湿度と蒸発, コロナ社, 141(2014)
- 6) 同上, 83
- 7) 藤原仁志, 荒川忠一. 乱流入門, 東海大学出版会, 2(1999)

謝辞

本研究を進めるにあたり，様々なご指導，ご教授いただきました高知工科大学システム工学群 松本泰典准教授に深く感謝いたします．また，株式会社コア電子の栗島社長，松岡順一氏，竹井智也氏，楠本智明氏，有光義城氏，板谷茂氏，東洋露紙株式会社，の大江亮一氏，田口博規氏，ものづくり先端技術研究室の皆様には御指導御鞭撻を賜りました．ここに厚くお礼申し上げます．